

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky**

**Modernizace laboratorních úloh z elektroniky - modulace
signálu**

Modernization of the Electronics Labs - Signal Modulation

2013

Lukáš Neděla

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Neděla**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika
Téma: **Modernizace laboratorních úloh z elektroniky - modulace signálu**
Modernization of the Electronics Labs - Signal Modulation

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte základní rozbor možných způsobů modulace signálu v nf i vf aplikacích.
2. Navrhněte a realizujte vybraný typ amplitudového modulátoru a demodulátoru.
3. Na realizovaném vzorku proveďte demonstrační měření a vypracujte vzorový laboratorní protokol.

Seznam doporučené odborné literatury:

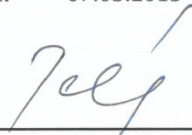
Dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

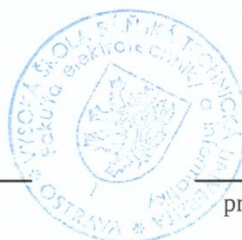
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

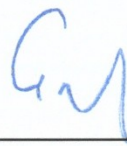
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry

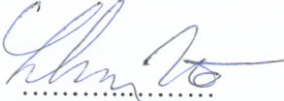



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 1. 5. 2013



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá základním rozbořem modulací, které se používají v nf a vf aplikacích. Práce je rozdělena na dvě části. V první části jsou teoreticky rozebrány modulace ve dvou základních skupinách, a to přeneseném pásmu a základním pásmu. Ve druhé části se bakalářská práce zabývá praktickým zapojením amplitudového modulátoru, který je realizován pomocí transkonduktančního operačního zesilovače, a praktickým zapojením aktivního demodulátoru.

Klíčová slova

Modulace, modulační signál, nosný signál, modulovaný signál, modulátor, demodulátor, analogové modulace, digitální modulace, kódované modulace, AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, PAM, PWM, PPM, PCM, DM, RC oscilátor, OTA, aktivní demodulátor.

Abstract

This bachelor thesis deals with the basic analysis of modulation used in LF and HF applications. The thesis is divided into two parts. The first part offers a theoretical analysis of the modulations in two main groups, namely metaphorical band and baseband. In its second part, the thesis deals with the practical involvement of the amplitude modulator realized with the help of the transconductance operational amplifier and with the practical involvement of the active demodulator.

Key Words

Modulation, modulation signal, carrier signal, modulated signal, modulator, demodulator, analog modulation, digital modulation, coded modulation, AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, PAM, PWM, PPM, PCM, DM, RC oscillator, OTA, active demodulator.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
ADM	Adaptive Delta Modulation	Adaptivní modulace Delta
AM	Amplitude Modulation	Amplitudová modulace
AM-DSB	Amplitude Modulation - Double Side Band	Amplitudová modulace se dvěma postranními pásmy
AM-SSB	Amplitude Modulation - Single Side Band	Amplitudová modulace s jedním postranním pásmem
ASK	Amplitude-Shift Keying	Amplitudové klíčování
BFSK	Binary Frequency-Shift Keying	Dvoustavové frekvenční klíčování
BPSK	Binary Phase-Shift Keying	Dvoustavové fázové klíčování
D/A	Digital-to-Analog Converter	Digitálně analogový převodník
DC/DC	DC-to-DC Converter	Stejnoseměrný měnič
DM	Delta Modulation	Modulace Delta
DPCM	Differential Pulse Code Modulation	Diferenciální pulzně kódovaná modulace
DPP	Lower Side Band	Dolní postranní pásmo
FM	Frequency Modulation	Frekvenční modulace
FSK	Frequency-Shift Keying	Frekvenční klíčování
HPP	Upper Side Band	Horní postranní pásmo
LDM	Linear Delta Modulation	Lineární modulace Delta
OTA	Operational Transconductance Amplifier	Transkonduktanční zesilovač
PAM	Pulse-Amplitude Modulation	Pulzně amplitudová modulace
PCM	Pulse-Code Modulation	Pulzně kódová modulace
PM	Phase Modulation	Fázová modulace
PPM	Pulse-Position Modulation	Pulzně polohová modulace
PSK	Phase-Shift Keying	Fázové klíčování
PWM	Pulse-Width Modulation	Pulzně šířková modulace

Obsah

1	Úvod	1
2	Modulace.....	2
2.1	Historie.....	2
2.2	Rozdělení	2
3	Modulace v přeneseném pásmu	4
3.1	Analogová modulace.....	4
3.1.1	Amplitudová modulace	4
3.1.2	Amplitudová modulace AM-DSB.....	8
3.1.3	Amplitudová modulace AM-SSB	9
3.1.4	Frekvenční modulace	10
3.1.5	Fázová modulace.....	14
3.2	Diskrétní modulace	15
3.2.1	Modulace ASK.....	16
3.2.2	Modulace FSK	17
3.2.3	Modulace PSK	19
4	Modulace v základním pásmu.....	21
4.1	Nekódované modulace.....	21
4.1.1	Modulace PAM	21
4.1.2	Modulace PWM	24
4.1.3	Modulace PPM.....	25
4.2	Kódované modulace.....	26
4.2.1	Modulace PCM	26
4.2.2	Diferenční kódovaná modulace DPCM	29
4.2.3	Modulace Delta DM.....	30
4.2.4	Adaptivní modulace Delta ADM	31
5	Praktická část	32
5.1	RC oscilátor	32
5.2	Transkonduktanční modulátor	33
5.3	Aktivní demodulátor	36
6	Závěr	37
	Použitá literatura	38
	Seznam příloh	39

1 Úvod

Přenášet informace na delší vzdálenosti se lidstvo snaží odnepaměti. S příchodem elektronických systémů se ke svému slovu dostává modulace. V telekomunikačních sítích se nejprve hojně využívaly analogové modulace, s postupem času je vystřídaly digitální modulace, které měly lepší vlastnosti. Současnost můžeme považovat za dobu digitální, kde rozdíl mezi audio signálem a video signálem v přenosovém kanálu není tak zjevný jako u analogové modulace.

Bakalářská práce se na začátku, v druhé kapitole, zabývá modulací všeobecně, jak vzniká, něco málo z její historie a její základní rozdělení. Třetí kapitola je zaměřena na modulaci v přeneseném pásmu pomocí analogových a digitálních modulací, kde se mění jeden ze tří parametrů (amplituda, frekvence, fáze). V další kapitole následují modulace v základním pásmu, kde jsou modulace rozděleny na kódované a nekódované. Tyto modulace daly základ digitálním modulacím v přeneseném pásmu. V poslední kapitole je popsán amplitudový modulátor a demodulátor, který slouží k laboratorním účelům.

Cílem této bakalářské práce je objasnit základní typy modulací, které se využívaly v elektronice, popřípadě se stále využívají. Jako další cíl je sestavení laboratorního přípravku, na kterém lze jednoznačně demonstrovat analogovou amplitudovou modulaci, a následně vypracovat vzorový laboratorní protokol.

2 Modulace

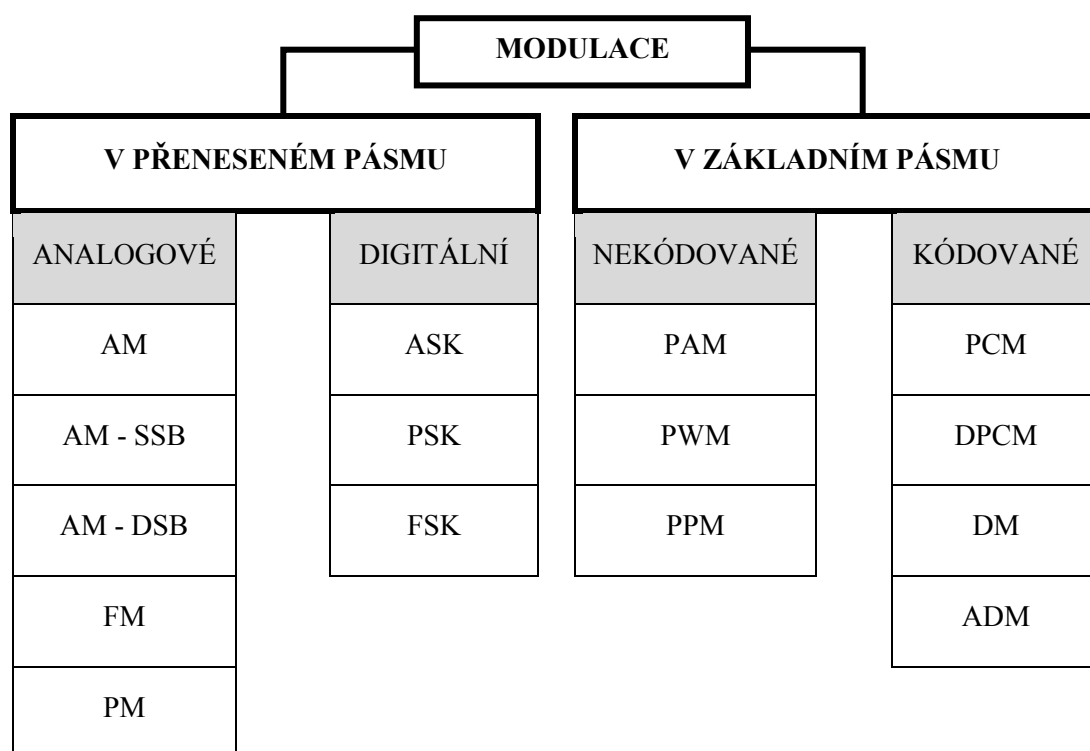
Od počátků vývoje elektroniky bylo zapotřebí přenášet signál na delší vzdálenosti či jej upravit pro další zpracování, například v číslicových systémech. Z historického hlediska se jednalo o celou řadu analogových a digitálních modulací, které modulační signál transformovaly na vysokofrekvenční signál nebo jej digitalizovaly. Díky modulaci tak můžeme nízkofrekvenční signály přenášet do pásma podstatně vyšších frekvencí, které jsou schopné bezdrátového přenosu. Modulace je tedy proces, při kterém pomocí modulačního signálu ovlivňujeme jeden, nebo více parametrů nosného signálu, např. amplitudu, fázi, šířku impulzu, frekvenci aj. Modulační signál vstupuje společně s nosným signálem do modulátoru, kde vzniká modulovaný signál. Modulovaný signál je pak přenášen dle potřeby do demodulátoru, kde se zpětně transformuje na původní informaci.

2.1 Historie

Historicky nejstarší modulace jsou analogové modulace. První pokusy, a to konkrétně s amplitudovou modulací, byly těsně po roce 1900. S postupem času začaly analogové modulace nahrazovat modulace diskrétní v základním pásmu a následně i přeneseném pásmu. Nejstarší diskrétní modulace v základním pásmu jsou nekódované, které následně vystřídaly modulace kódované. Nejmladší, a komerčně nejvyužívanější v dnešní době, jsou diskrétní modulace v přeneseném pásmu, které se často označují jako digitální modulace. [6] [1]

2.2 Rozdělení

Modulace jsou rozděleny na dvě základní skupiny. Do první skupiny spadají modulace v přeneseném pásmu, které obsahují analogové a digitální modulace. Druhou skupinou jsou modulace v základním pásmu, pod které spadají kódované a nekódované modulace. [6]



Obrázek 1: *Základní rozdělení modulací* [6]

3 Modulace v přeneseném pásmu

Z důvodu přenášení signálů na delší vzdálenosti se modulační signál „namoduloval“ na vysokofrekvenční nosnou vlnu, která se lépe šíří prostorem. U modulací v přeneseném pásmu se mění, dle modulačního signálu, jeden z parametru nosné vlny, a to buď amplituda, frekvence nebo fáze.

3.1 Analogová modulace

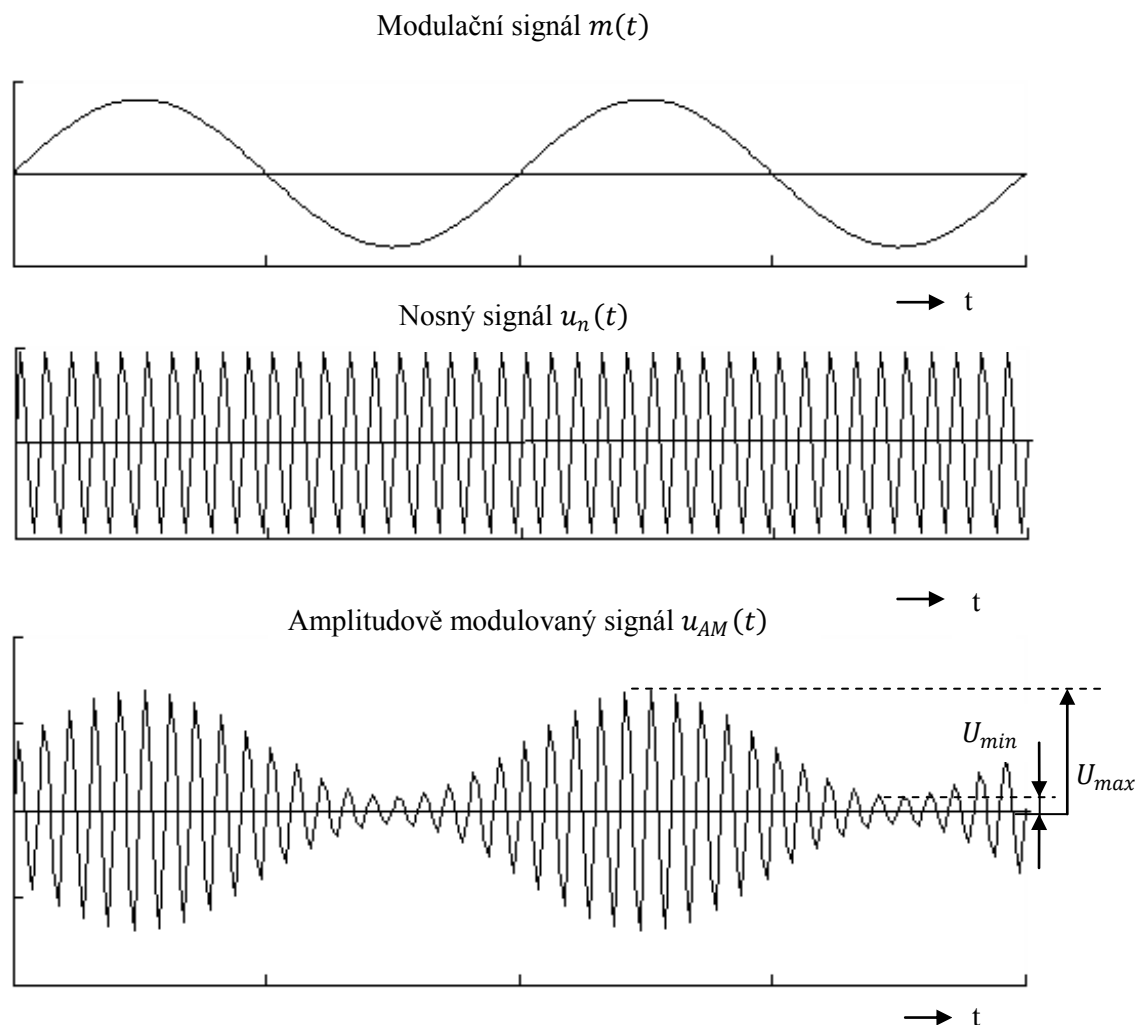
Nejstarší radiokomunikační systémy využívaly pro přenos dat analogovou amplitudovou modulaci AM. Jelikož modulace AM a její varianty nebyly dostačující, co do kvality a složitosti obvodů, nahradily je frekvenční modulace FM a fázová modulace PM. V současné době má modulace AM využití v rozhlasích a občanských radiostanicích. FM modulace je na tom podstatně lépe, její komerční využití se nejvíce uplatnilo ve stereofonním rozhlasu, systémech družicové televize a do nedávna v přenosu analogového televizního signálu (zvuková stopa). V radiové komunikaci je analogová modulace stále častěji nahrazována digitální modulací. [2]

3.1.1 Amplitudová modulace

Jedná se o nejstarší typ analogové modulace. První experiment amplitudové modulace byl uskutečněn v roce 1906 Reginaldem Fessendenem, jednalo se o přenos zvukového signálu. Komerční využití amplitudové modulace bylo v letech 1920 až 1970 především v radiovém vysílání stanic, které vysílají mluvené slovo. Amplitudová modulace je modulací lineární.

Princip

Amplituda vysokofrekvenčního nosného signálu se mění v závislosti na okamžité hodnotě nízkofrekvenčního modulačního signálu (obr. 2). Amplituda modulačního signálu je v každém okamžiku součet nebo rozdíl amplitudy nosného signálu. Mění se pouze amplituda vysokofrekvenčního signálu, frekvence zůstává konstantní.



Obrázek 2: Časové průběhy amplitudové modulace

Matematicky lze vyjádřit modulační harmonický signál $m(t)$ a harmonický nosný signál $u_n(t)$ jako

$$m(t) = U_m \cos(2\pi f_m t) \quad (3.1)$$

kde U_m je amplituda modulačního signálu; f_m harmonická modulační frekvence,

$$u_n(t) = U_n \cos(2\pi f_c t) \quad (3.2)$$

kde U_n je amplituda modulačního signálu; f_n harmonická modulační frekvence.

Výsledný modulovaný signál nám pak popisuje vztah

$$u_{AM}(t) = [U_c + U_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) = U_c [1 + m_a \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (3.3)$$

Ve vztahu se nám objevuje m_a , jež představuje činitel (index) modulace. Činitel modulace je dán poměrem amplitudy modulačního signálu a amplitudy nosného signálu.

$$m_a = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})} = \frac{U_m}{U_n} \quad (3.4)$$

Obvykle se činitel modulace udává v procentech, mluvíme tak o hloubce modulace nebo procentu modulace

$$m_a \% = m_a 100 \% \quad (3.5)$$

Je-li činitel modulace m_a vyšší než 1 dochází k přemodulování a zkreslení výsledné modulace. Pokud chceme předcházet při modulaci zkreslení, musíme dodržet následující podmínky:

Vhodný činitel modulace $0 \leq m_a \leq 1$

Kmitočet nosné vlny musí být mnohonásobně vyšší než nejvyšší modulační kmitočet
 $f_n \gg f_{m \max}$

Modulujeme-li nosnou vlnu obecným nesinusovým signálem $m(t)$, vycházíme ze vztahu

$$u_{AM}(t) = U_n [1 + k_{AM} m(t)] \cos(2\pi f_n t) \quad (3.6)$$

kde k_{AM} představuje konstantu nazývanou amplitudová citlivost modulátoru AM. Pojmem procento modulace označujeme konstantu k_{AM} vynásobenou 100. Opět platí, že citlivost modulátoru AM musí být $0 \leq k_{AM} \leq 1$, jinak bude docházet ke zkreslení.

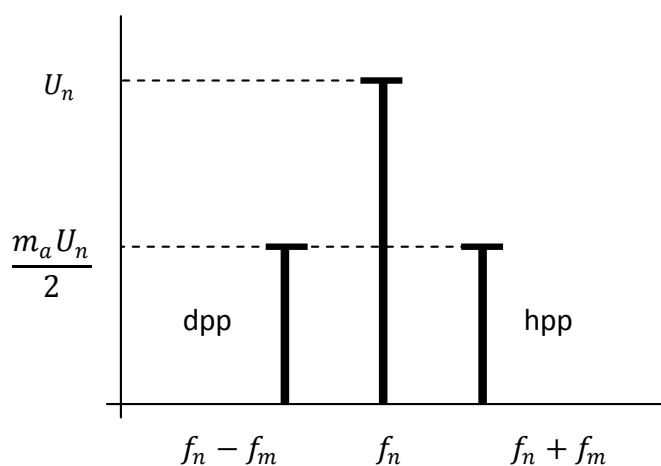
Kmitočtové spektrum

Kmitočtové spektrum amplitudové modulace, při které je nosná vlna modulovaná jediným harmonickým signálem vychází ze vztahu

$$u_{AM}(t) = U_n \cos(2\pi f_n t) + \frac{m_a U_n}{2} [\cos 2\pi(f_n - f_m)t + \cos 2\pi(f_n + f_m)t] \quad (3.7)$$

Jak je vidět na obrázku 3, kmitočtové spektrum se skládá z nosné vlny o amplitudě U_n . Nosná vlna, která má činitel modulace $m_a = 1$, zabírá 2/3 celkového výkonu modulátoru. Nosná vlna nenese žádnou informaci. Kmitočtové spektrum dále obsahuje dvě postranní pásma, která se nacházejí symetricky od nosné vlny ve vzdálenosti $+f_m$ a $-f_m$. Amplituda postranních modulačních složek je dána vztahem

$$\frac{U_m}{2} = \frac{m_a U_n}{2} \quad (3.8)$$

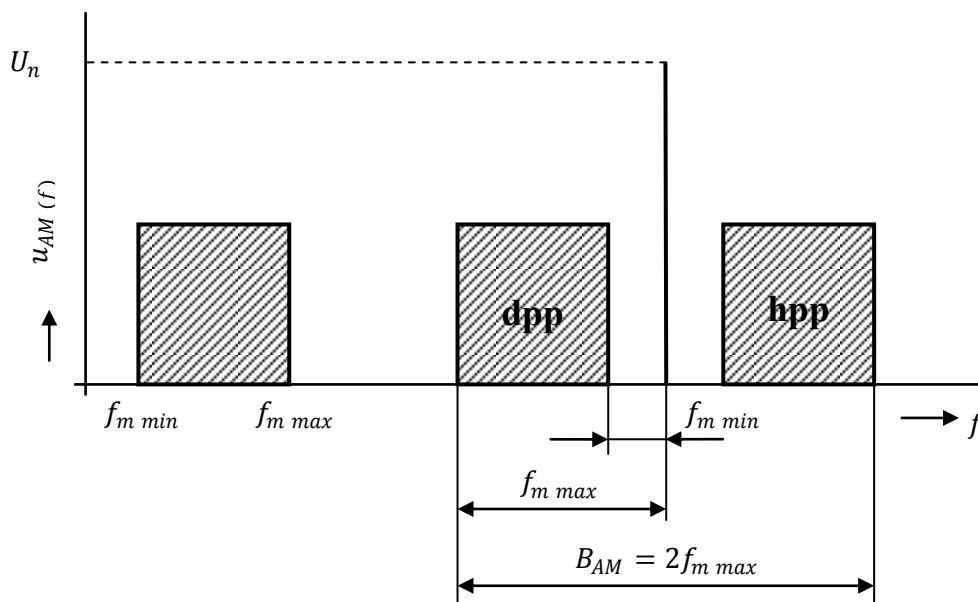


Obrázek 3: Kmitočtové spektrum harmonického signálu [2]

Při obecném modulačním průběhu $m(t)$ je kmitočtové spektrum dáno Fourierovou transformací časového průběhu modulovaného oboustranného signálu, který je vyjádřen vztahem

$$F_{AM}(f) = \frac{U_n}{2} [\delta(f - f_n) + \delta(f + f_n)] + \frac{m_a U_n}{2} [M(f - f_n) - M(f + f_n)] \quad (3.9)$$

Kmitočtové spektrum (obr. 4) obsahuje nosnou vlnu U_n a dvě postranní pásma. Graf předpokládá, že obě spektrální složky mají stejnou amplitudu.



Obrázek 4: Kmitočtové spektrum obecného signálu [2]

Vysokofrekvenční šířka kanálu B_{AM} je dána vztahem $B_{AM} = 2f_{m \max}$. (3.10)

Vzhledem k tomu, že maximální přenášený kmitočet amplitudové modulace je 4,5 kHz, maximální frekvenční šířka kanálu je tedy 9 kHz.

3.1.2 Amplitudová modulace AM-DSB

Jelikož velkou část vysílacího výkonu zabírala nosná vlna, která nenese žádnou informaci, tak se již od počátku objevila myšlenka vytvořit AM modulaci, která vysílá pouze postranní pásma. Nosná vlna je tedy úplně nebo částečně potlačena. A proto vznikla amplitudová modulace s oběma postranními pásmy, která má podle anglického výrazu Double Side Band zkratku DSB.

Signál s potlačenou nosnou vlnou získáme pouhým násobením modulačního signálu $m(t)$ nosným signálem $u_n(t)$, tedy

$$u_{DSB} = U_n \cos(2\pi f_n t) m(t) \quad (3.11)$$

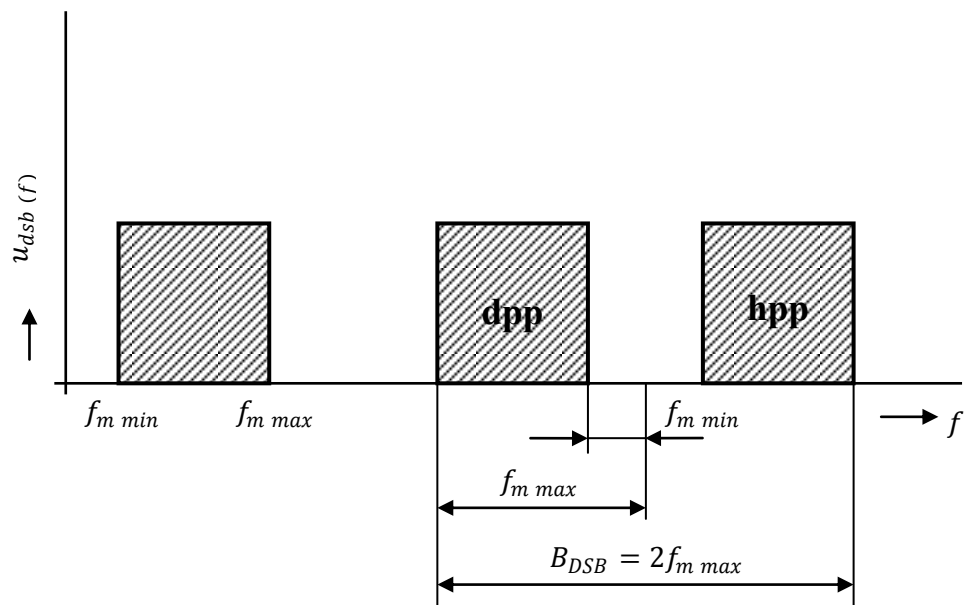
Obecný periodický modulační signál $m(t)$ lze pomocí Fourierovi řady vyjádřit jako součet kosinusových složek

$$m(t) = \sum_{m=1}^n U_m \cos(2\pi f_m + \Phi_m) \quad (3.12)$$

kde Φ_m je fáze, $f_1 = f_{m \min}$ náleží nejnižší (základní) harmonické a $f_n = f_{m \max}$ nejvyšší harmonické modulačního signálu. Výsledný matematický vztah pro AM-DSB je tedy

$$u_{DSB} = U_n \cos(2\pi f_n t) U_m \cos(2\pi f_m t) = \frac{U_n U_m}{2} \cos 2\pi(f_n - f_m)t - \frac{U_n U_m}{2} \cos 2\pi(f_n + f_m)t \quad (3.13)$$

Kmitočtové spektrum F_{DSB} je podobné jako u F_{AM} , pouze nosná vlna je potlačena. Postranní pásma jsou stejné jako u F_{AM} .

Obrázek 5: Kmitočtové spektrum F_{DSB} [2]

Potřebná šířka pásma je dána vztahem

$$B_{DSB} = 2f_{m \max} \quad (3.14)$$

3.1.3 Amplitudová modulace AM-SSB

Jelikož je přenášená informace obsažena, jak v dolním postranním pásmu, tak i v horním postranním pásmu, je možné úplně potlačit jednu z těchto složek včetně nosné vlny. Vzniká nám tak amplitudová modulace s jedním postranním pásmem, která má podle anglického výrazu Single Side Band zkratu SSB. Hlavní výhodou AM-SSB je ten, že se výkon soustředí pouze na jedno postranní pásmo a má oproti AM lepší šumové vlastnosti.

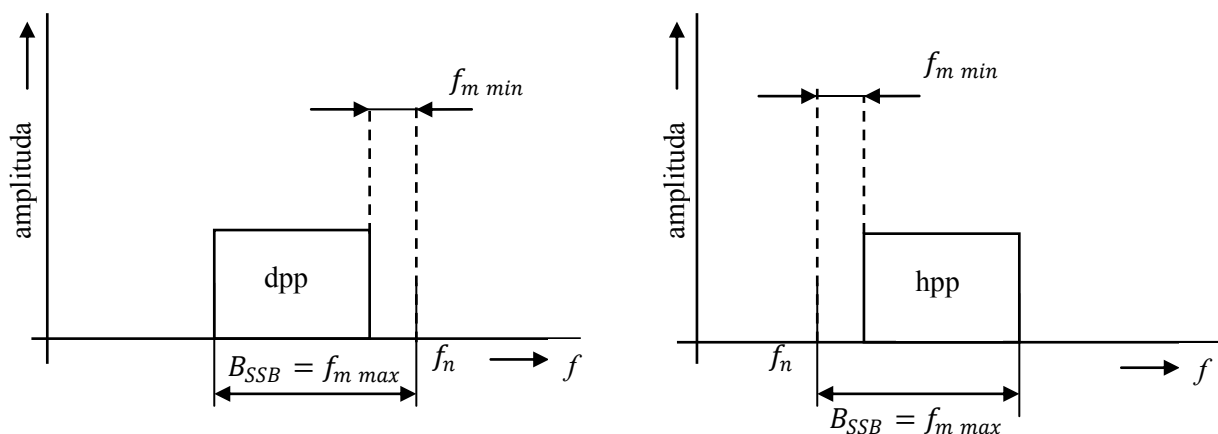
Nejjednodušší způsob jak získat modulovaný signál AM-SSB je pomocí filtrační metody. Její princip je ten, že pomocí AM modulátoru se nemoduluje signál, který pak následuje do pásmové propusti. Pásmová propust je buď typu dolního, nebo horního postranního pásma. Velmi důležitým parametrem filtru jsou strmé přechody mezi propustným a nepropustným pásmem. Ty mají za následek potlačení veškerých nežádoucích frekvencí a postranních pásem včetně nosné vlny. [1]

Matematicky lze modulaci AM-SSB vyjádřit jako

$$u_{SSB}(t) = \frac{U_C}{2} [m(t)\cos(2\pi f_n t) \pm \bar{m}(t)\cos(2\pi f_n t)] \quad (3.15)$$

Podle znaménka v závorce nám vznikne buď dolní postranní pásmo (odčítání) nebo horní postranní pásmo (sčítání). Výraz $\bar{m}(t)$ je dán Hilbertovou transformací modulačního signálu $m(t)$.

Kmitočtové spektrum (obr. 6) se skládá pouze z jednoho postranního pásma. Šířka kanálu je tedy $B_{SSB} = f_{m \max}$.



Obrázek 6: Kmitočtové spektrum AM-SSB [2]

3.1.4 Frekvenční modulace

Frekvenční modulace FM je modulací úhlovou. V roce 1933 byla patentována Edwinem Howardem Armstrongem. Přenos pomocí frekvenční modulace zvýšil kvalitu vysílání a odolnost proti rušivým elementům. Praktické využití našla v oblastech radiového stereofonního vysílání, profesionální zvukové techniky, družicového příjmu a analogového televizního vysílání (zvuková stopa). Je nejpoužívanějším typem analogové modulace. [5]

Princip

Amplituda nosné vlny resp. její obálka je konstantní, mění se pouze frekvence nosné vlny (obr. 7). Libovolný signál s úhlovou modulací lze vyjádřit obecným vztahem

$$u_m(t) = U_n \cos[\Omega_i(t)] \quad (3.16)$$

kde $\Omega_i(t)$ je okamžitá fáze modulované vlny; U_n konstantní amplituda nosné vlny. U frekvenční modulace je tedy okamžitá frekvence $f_i(t)$ modulovaného signálu rovna součtu konstantního kmitočtu f_n nemodulované nosné vlny a časově proměnné složky, přímo úměrné modulačnímu napětí, tedy

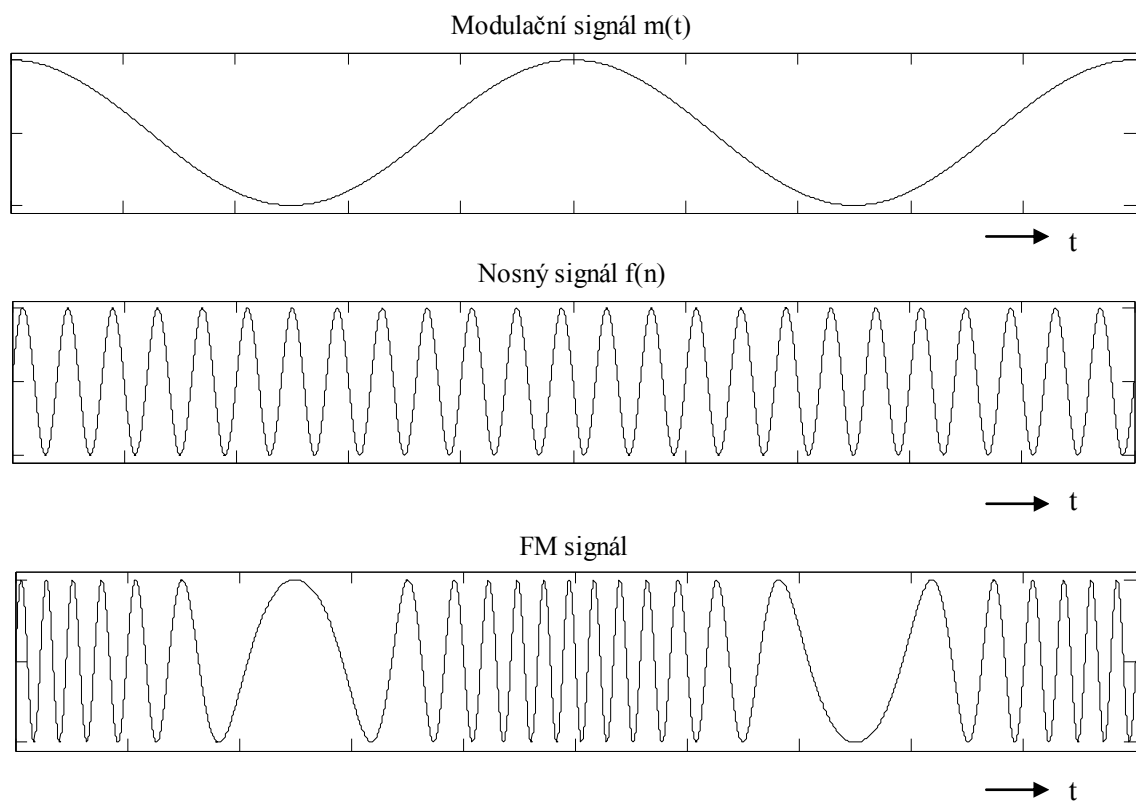
$$f_i(t) = f_n + k_{FM}m(t) \quad (3.17)$$

kde k_{FM} představuje kmitočtovou citlivost modulátoru FM, vyjádřenou v jednotkách [Hz/V]. Pro získání okamžité fáze modulovaného signálu stačí pouze rovnici (3.17) vynásobit 2π a integrovat

$$\Omega_i(t) = 2\pi f_n t + 2\pi k_{FM} \int_0^t m(t) dt \quad (3.18)$$

Dosazením vzorce (3.18) do (3.16) se získá obecný vztah, který reprezentuje frekvenčně modulovaný signál v časové oblasti

$$u_{FM}(t) = U_n \cos \left[2\pi f_n t + 2\pi k_{FM} \int_0^t m(t) dt \right] \quad (3.19)$$



Obrázek 7: Časové průběhy frekvenční modulace

Je-li harmonický modulační signál popsán vztahem $m(t) = U_m \cos(2\pi f_m t)$, s následným dosazením do rovnice (3.17), vychází nám pak okamžitá frekvence signálu FM, tedy

$$f_i(t) = f_n + k_{FM} U_m \cos(2\pi f_m t) = f_n + \Delta f \cos(2\pi f_m t) \quad (3.20)$$

Ve vztahu (3.20) se nám objevuje parametr Δf , který vyjadřuje kmitočtovou deviaci signálu FM a je dán vztahem $\Delta f = k_{FM} U_m$. (3.21)

Okamžitá fáze FM signálu s harmonickou modulační frekvencí je dána vztahem

$$\Omega_i = 2\pi \int_0^t f_i dt = 2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \sin(2\pi f_m t) = 2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t) \quad (3.22)$$

kde $\beta = \Delta f / f_m$ nám určuje index kmitočtové modulace. Velikost hodnoty β není nijak omezena, avšak v praxi se podle indexu kmitočtové modulace dělí na dva typy:

- index $\beta < 1$ tzv. úzkopásmová modulace FM. Má podobné parametry jako amplitudová modulace AM, zejména šířka pásma a šumový parametr.
- index $\beta_{FM} > 1$ nazývaná jako širokopásmá modulace FM. S rostoucím indexem β roste i šířka pásma a zároveň se po demodulaci na přijímací straně zvětšuje odstup signál/šum.

Index kmitočtové modulace β je pouze u frekvenční modulace, která je modulována sinusovým harmonickým signálem.

U obecného nesinusového signálu se setkáváme s pojmem deviační poměr D , který je definován vztahem

$$D = \frac{\Delta f_{max}}{f_{m \max}} \quad (3.23)$$

kde hodnota Δf_{max} je rovna maximálnímu kmitočtovému zdvihu; $f_{m \max}$ je maximální frekvence obsažená v modulačním signálu. Deviační poměr je pro frekvenční modulaci FM konstantní.

Kmitočtové spektrum

Určení šířky pásma u frekvenční modulace FM se nedá přesně vyjádřit. Zakládá se na různých kriteriích. Jedná se například o šířku pásma, ve kterém jsou přenášeny postranní složky s amplitudou větší než 1% amplitudy nosné vlny bez modulace.

Při modulaci jediným harmonickým modulačním signálem o kmitočtu f_m a s deviací Δf se v praxi nejčastěji určuje potřebná šířka pásma B_{FM} pomocí poloempirického Carsonova vzorce

$$B_{FM} \approx 2(f_m + \Delta f) = 2f_m(1 + \beta) \quad (3.24)$$

Je-li modulační signál obecného nesinusového tvaru, je třeba do Carsonova vzorce dosadit nejnepříznivější hodnoty, tj. maximální kmitočet $f_m = f_{m \max}$ obsažený ve spektru modulačního signálu a zároveň maximální (špičkovou) deviaci $\Delta f = \Delta f_{max}$, která odpovídá maximální amplitudě modulačního signálu. Po úpravě tedy získáme vztah

$$B_{FM} \approx 2(f_{m \max} + \Delta f_{max}) = 2\Delta f_{max} (1 + D) \quad (3.25)$$

3.1.5 Fázová modulace

Spadá stejně jako frekvenční modulace FM do kategorie modulací úhlových. Využití fázové modulace PM v praxi není příliš rozšířené kvůli obtížné demodulaci.

Princip

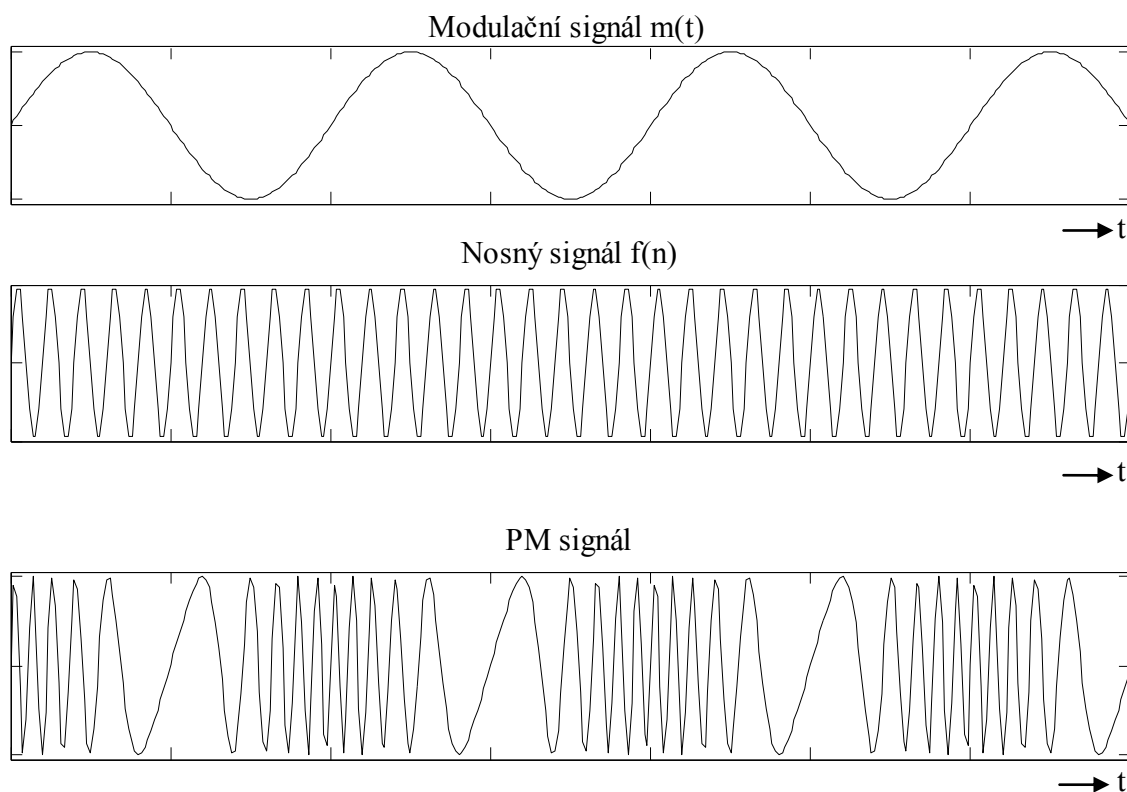
Modulační signál ovlivňuje fázi nosné vlny, amplituda zůstává konstantní (obr. 8). Okamžitá fáze modulovaného signálu se rovná součtu fázového úhlu nosné vlny a časově proměnné složky, která je přímo úměrná modulačnímu napětí. Okamžitá fáze se tedy vypočítá

$$\Phi_i(t) = 2\pi f_n t + \varphi(t) = 2\pi f_n t + k_{PM} m(t) \quad (3.26)$$

kde k_{PM} představuje fázovou citlivost modulátoru PM v rad/V.

Fázově modulovaný signál je tedy dán vztahem

$$u_{PM}(t) = U_n \cos[2\pi f_n t + \varphi(t)] = U_n \cos[2\pi f_n t + k_{PM} m(t)] \quad (3.27)$$



Obrázek 8: Časové průběhy fázové modulace

Kmitočtové spektrum

Jelikož jsou časové průběhy frekvenční modulace FM a fázové modulace PM podobné, také jejich kmitočtová spektra mají hodně společného. Jediný rozdíl je, že u fázové modulace se při změně modulační frekvence f_m a konstantní amplitudy modulačního napětí U_m změní odstup spektrálních čar, ale amplituda se nemění. Šířku pásma u fázové modulace vyjádříme

$$B_{PM} \approx 2f_{m \max} (1 + k_{PM}) = 2f_{m \max} (1 + \frac{\beta_{PM}}{U_m}) \quad (3.28)$$

kde $\beta_{PM} = k_{PM} U_m$ se označuje index fázové modulace.

Aby při demodulaci PM signálu nedocházelo k fázové „nejistotě“, musí být index fázové modulace menší nebo roven π , tedy $\beta_{PM} \leq \pi$. [1]

3.2 Diskrétní modulace

Diskrétní modulace v základním pásmu je možné přenášet po metalickém vedení či po optickém vlákne. Z důvodu velkých přenosových kapacit je však výhodnější diskrétní modulace transformovat na vysokofrekvenční nosnou vlnu. To má za následek to, že v jediném komunikačním kanálu lze přenášet více nezávislých informačních signálů. Jako modulační signály se nejvíce osvědčily binární modulační signály typu PCM a DM.

Diskrétní modulace dělíme na dva základní typy. První jsou modulace s konstantní obálkou, do kterých se řadí modulace s klíčováním kmitočtu FSK a modulace s klíčováním fáze PSK. U těchto druhů modulací se mění fáze nebo kmitočet nosné vlny a amplituda zůstává konstantní. Díky nežádoucím efektům může vzniknout parazitní amplitudová modulace, která znemožňuje zesílení pomocí nelineárních zesilovačů. Do kategorie modulace s proměnnou obálkou řadíme lineární modulaci s amplitudovým klíčováním ASK. Tato modulace má malou výkonovou účinnost, která je dána lineárním výkonovým zesilovačem s malou energetickou účinností.

Diskrétní modulace mohou nabývat dvou a více stavů. U dvojstavové modulace nabývá signál hodnot $\log 1$ a $\log 0$. Dvojstavové diskrétní modulace se označují písmenem B nebo 2 (např. BFSK, 2FSK). U vícestavové modulace nabývá M možných stavů, které lze vyjádřit jako

$$M = 2^n \quad (3.29)$$

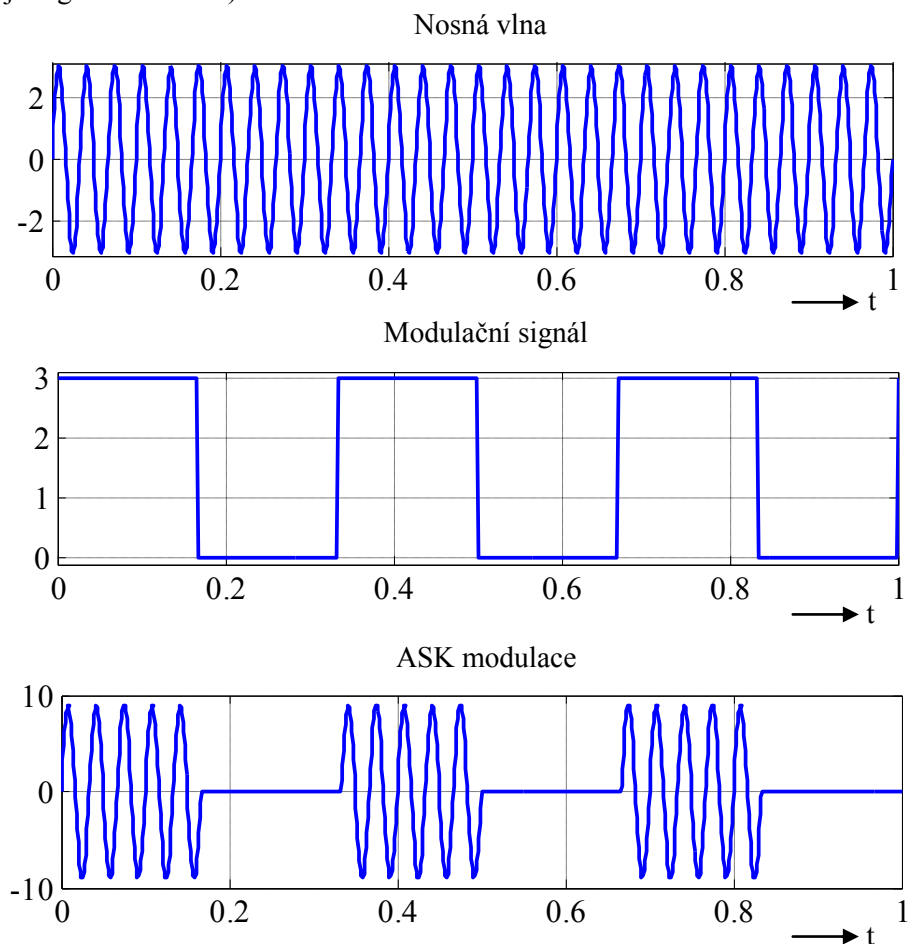
kde M počet stavů; n přirozené číslo ≥ 2 . Vícestavové modulace se označují písmenem M, které nám říká, o jakou stavovou modulaci jde (např. 16PSK, 8FSK). [3] [6] [7]

3.2.1 Modulace ASK

Obdobou analogové amplitudové modulace. V praxi se příliš nepoužívá, jelikož jde o kódování, které je citlivé na náhlé změny. Využívá se v kombinaci s jinými modulacemi jako např. s modulací PSK. Lineární digitální modulace bez paměti. Nejjednodušší typ ASK je tzv. ON-OFF klíčování, které se využívá pro přenos Morseovy abecedy. [5]

Princip

Binární hodnoty modulačního signálu mění hodnotu amplitudy nosné frekvence, při čemž frekvence nosné vlny zůstává konstantní. U dvojbystavové modulace odpovídá log 1 určité vyšší amplitudě nosné vlny a log 0 nižší amplitudě nosné vlny (v případě ON-OFF klíčování je log 0 rovno nule).



Obrázek 9: Časové průběhy ASK modulace (ON-OFF klíčování)

3.2.2 Modulace FSK

Modulace FSK se řadí mezi modulace s konstantní obálkou. Oproti modulaci ASK má tu výhodu, že je možné potlačit amplitudové rušení. Využití modulace FSK je zejména pro přenos mobilních dat u bezdrátových telefonů. Nejjednodušší FSK klíčování je opět dvojestavové klíčování BFSK (2FSK). [2]

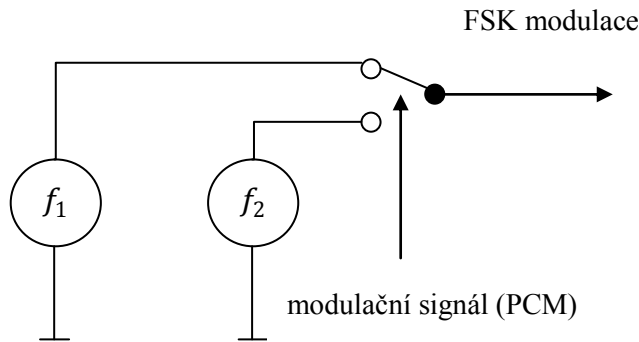
Princip

Binární hodnoty modulačního signálu jsou přenášeny jako dvě odlišné frekvence. U dvojestavové modulace odpovídá log 1 určitému kmitočtu f_1 a log 0 kmitočtu f_2 . Kmitočty f_1 a f_2 jsou často označovány jako signalizační kmitočty, které lze vyjádřit jako

$$f_1 = f_c - \Delta f \quad (3.30)$$

$$f_2 = f_c + \Delta f \quad (3.31)$$

kde f_c je kmitočet nemodulované nosné vlny; Δf je kmitočtový zdvih.



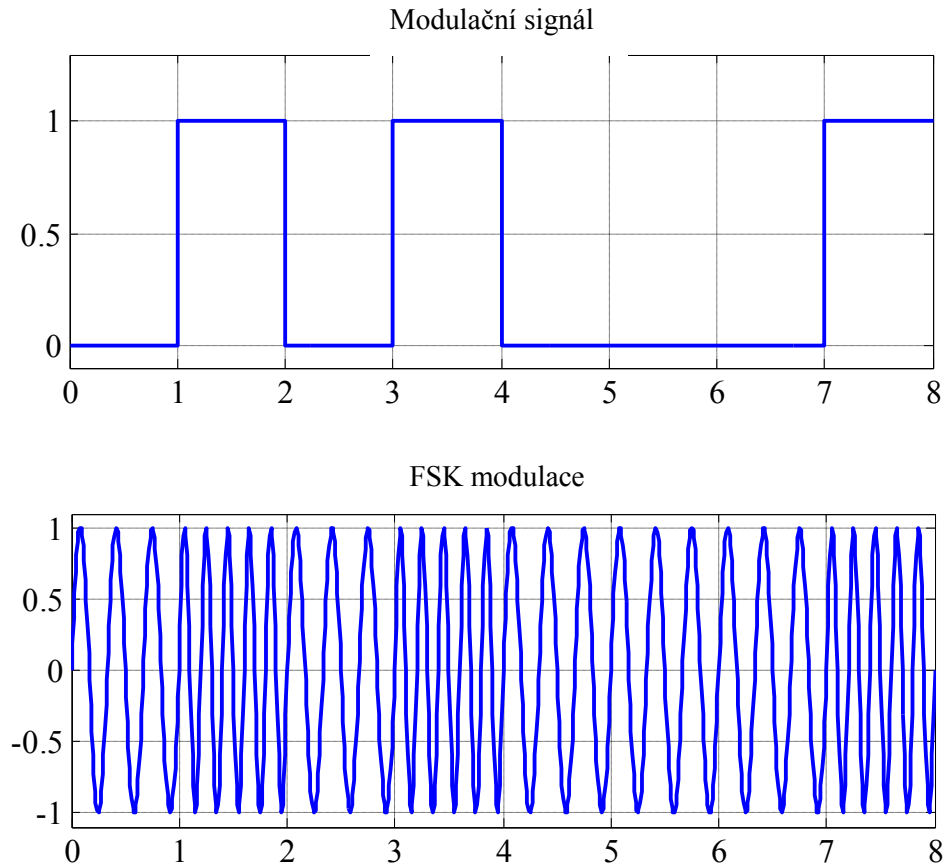
Obrázek 10: Princip modulace BFSK [1]

Výsledný modulovaný signál $s_{FSK}(t)$ lze pak vyjádřit obecným vztahem

$$s_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t], \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární 1}) \quad (3.32)$$

$$s_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi(f_c - \Delta f)t], \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární 0}) \quad (3.33)$$

kde $\sqrt{2E_b/T_b}$ je amplituda modulované vlny; E_b představuje energii modulovaného signálu na jeden modulační bit; T_b představuje bitovou periodu.



Obrázek 11: Časové průběhy FSK modulace [5]

Podobně jako u modulace FM, tak i u modulace BFSK, je jeden z parametrů index modulace, který se oproti FM modulaci značí písmenem h a je dán vztahem

$$h = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{\Delta f}{(f_b/2)} = \frac{\Delta f_{ss}}{f_b} \quad (3.34)$$

Jestliže za Δf a f_m dosadíme maximální hodnoty, vzniká nám deviační poměr D .

Šířka pásma

Šířku pásma BFSK modulace určíme podle Carsonova vzorce, který je ve tvaru

$$B_{FSK} \approx 2(B_0 + \Delta f) \quad (3.35)$$

kde B_0 představuje šířku pásma modulačního signálu v základním pásmu, která je u FM modulace většinou rovna nejvyšší modulační frekvenci $f_{m \max}$. Při Nyquistově filtraci pravoúhlých modulačních impulzů je šířka základního pásma $B_0 = f_b/2$. Výsledná šířka pásma signálu s BFSK modulací je tedy

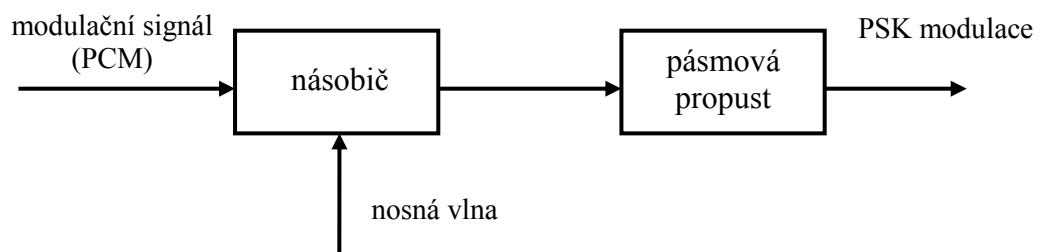
$$B_{FSK} = 2(f_b/2 + \Delta f) = f_b + 2\Delta f \quad (3.36)$$

3.2.3 Modulace PSK

Oproti ASK a FSK modulaci je značně odolná vůči šumu, rušení a dalším nežádoucím vlivům. Avšak má mnohem vyšší šířku vysokofrekvenčního pásma. To však lze eliminovat přechodem na vyšší počet M-stavů PSK modulace.

Princip

Modulační binární signál ovlivňuje fázi nosné frekvence. Amplituda nosné frekvence zůstává konstantní. Nejjednodušší realizace modulace BPSK je pomocí analogového násobiče (obr. 12). U dvojstavové modulace BPSK nabývá fáze dvou diskrétních stavů a to např. 0° a 180° . [1]



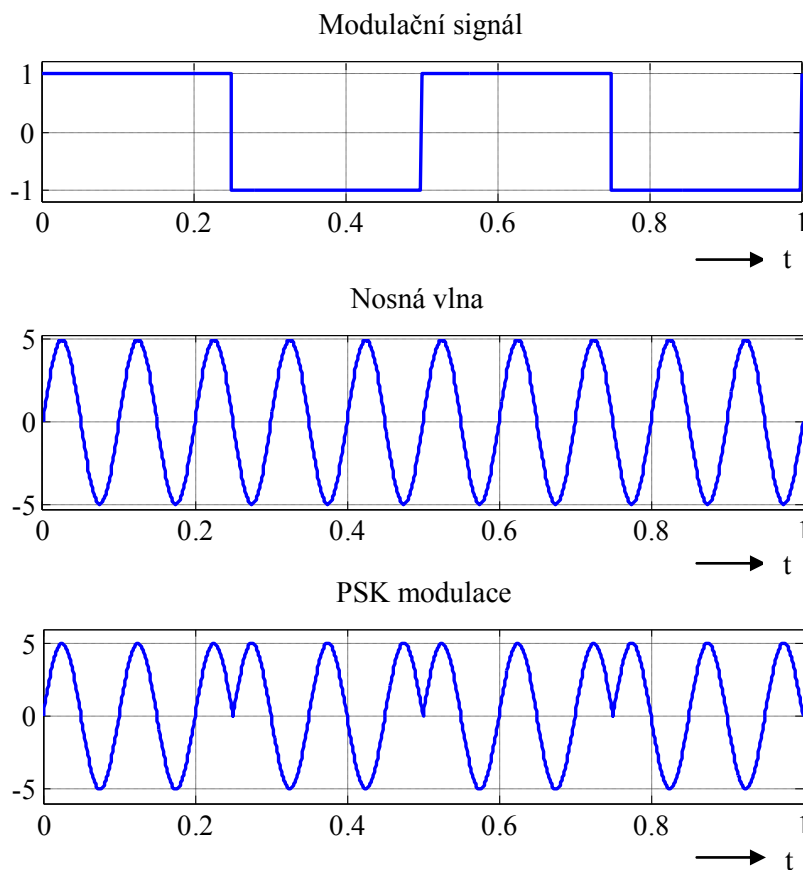
Obrázek 12: Princip PSK modulace [1]

U modulace BPSK lze tyto dva diskrétní stavy vyjádřit pomocí vzorců

$$s_{PSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární 1}) \quad (3.37)$$

$$s_{PSK}(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad \text{pro } 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{binární 0}) \quad (3.38)$$

kde $\sqrt{2E_b/T_b}$ je amplituda modulované vlny; E_b představuje energii modulovaného signálu na jeden modulační bit; T_b představuje bitovou periodu.



Obrázek 13: Časové průběhy PSK modulace [5]

Šířka pásma

Šířku pásma PSK modulace nám určuje bitová rychlost modulačního signálu, kde první harmonická je při nejnepříznivějším případě dána $f_{m \max} = f_b/2$. Takže výsledná šířka pásma PSK modulace je

$$B_{PSK} = f_b = 1/T_b \quad (3.39)$$

Výsledná šířka pásma odpovídá idealizovanému případu filtrace modulačního signálu s propustným pásmem $B_0 = 2f_b$.

4 Modulace v základním pásmu

Diskrétní modulace v základním pásmu se využívají zejména pro jednodušší přenos komunikačním kanálem a k jednoduššímu zpracování. Mají za úkol transformovat analogový modulační signál, který leží v základním pásmu, na diskrétní impulzový signál, který se opět nachází v základním pásmu. Diskrétní signály v základním pásmu se nejčastěji přenášejí pomocí optických kabelů a metalických spojů. Diskrétní modulace, často označované jako digitální modulace, mají oproti analogovým modulacím značné výhody, a proto je postupně nahrazují. Modulace v základním pásmu dělíme na kódované a nekódované. [6]

4.1 Nekódované modulace

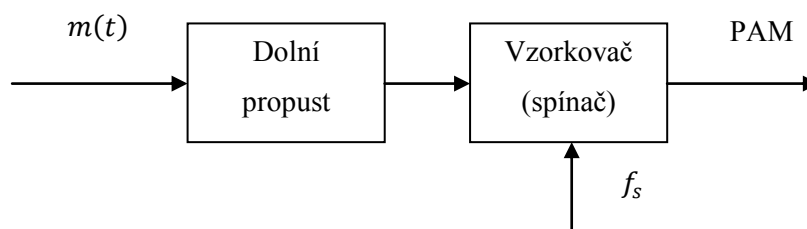
Nekódované modulace nám převádějí analogový signál na diskrétní (impulzový) signál, který se dále zpracovává v digitálních aplikacích. Hlavním představitelem této skupiny je pulzní amplitudová modulace PAM, při které je analogový signál přiveden na spínač řízený pravoúhlými impulsy. Výsledek je pak sled nespojitých impulzů, jejichž amplituda kopíruje modulační signál. Nahradíme-li spínač vzorkovačem, dostaneme jednu z modifikací PAM. Okamžitou amplitudu modulačního signálu je možné převést na šířku pulsu nosného signálu, tím dostaneme pulzní šířkovou modulaci PWM. Jestliže zůstane šířka pulzu konstantní, a změníme pouze jeho polohu vůči nominální poloze, získáváme tak pulzní polohovou modulaci PPM.

4.1.1 Modulace PAM

Hlavní zástupce nekódované modulace v základním pásmu. Označována jako PAM. Využívá se obvykle pro převod analogového signálu na impulsní signál. Amplituda impulsů se mění v závislosti na analogovém signálu. [2]

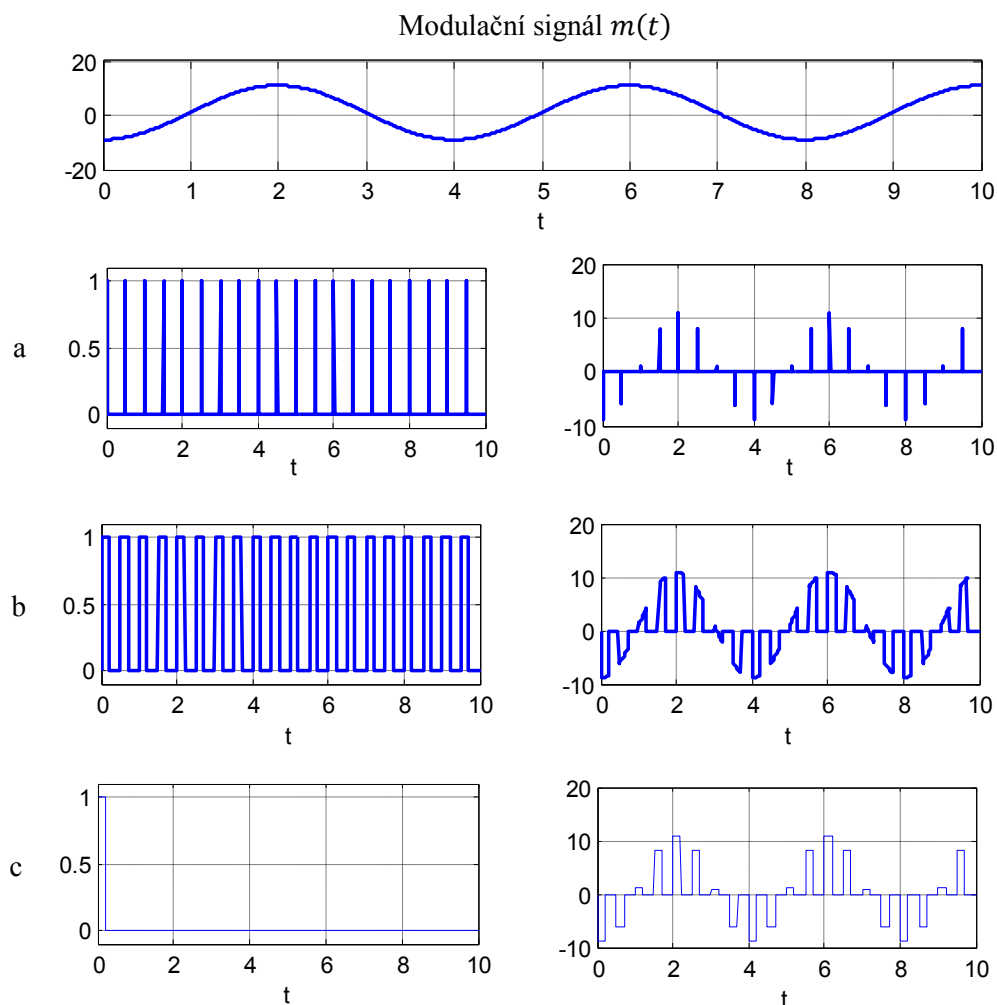
Princip

Modulační signál $m(t)$ nejprve prochází dolnoproustným filtrem, který má za úkol šířku pásma omezit na $B = f_{m \max}$ a tak odstranit rušivé harmonické složky. Signál dále pokračuje na spínač, který je řízený pravidelnými periodickými impulsy. Řídící spínací impulsy se nazývají také jako vzorkovací či spínací funkce. Všeobecně můžeme považovat řídící spínací impulsy jako nemodulovanou impulzovou nosnou vlnu.



Obrázek 14: Vytváření signálu s impulzovou amplitudovou modulací PAM [1]

Vzorkování se provádí pomocí vzorkovací periody T_s , která má vzorkovací frekvenci $f_s = 1/T_s$. Analogový spínač vzorkuje signál $m(t)$ a tím vzniká signál PAM. Pokud jsou modulované impulzy typu $\delta(t)$, označujeme je jako okamžité vzorkování (obr. 15a). Jestliže jsou impulzy prodlouženy na šířku pulzů T_i , mluvíme tak o věrném vzorkování, při kterém temena impulzů věrně sledují modulační signál (obr. 15b). V praxi se často využívá tzv. uniformní vzorkování, při kterém se vytvářejí pravoúhlé impulzy pomocí vzorkovače s pamětí (obr. 15c). Hlavní výhodou vzorkovače s pamětí je ta, že může vytvářet relativně dlouhé vzorky, které jsou výhodné pro další zpracování signálu, například v kodéru PCM, který má často omezenou pracovní rychlost a nedokázal by příliš krátké vzorky vyhodnotit.



Obrázek 15: Časové průběhy PAM modulace [5]

Vzorkovací teorém

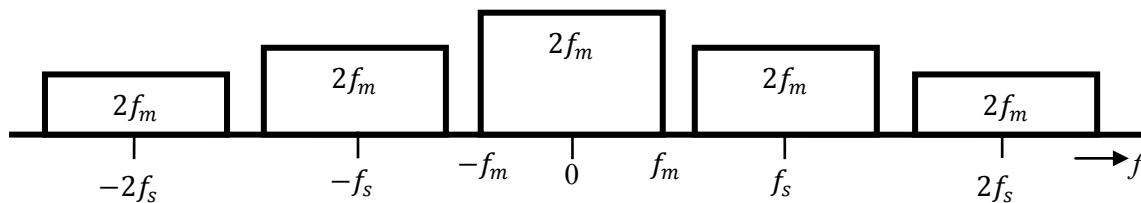
Charakteristickým rysem PAM modulace je ta, že informace je přenášena z hlediska času nespojitě. Avšak modulovaný parametr impulzů je přenášen spojitě. Aby nedocházelo ke zkreslení přenášené informace, musí kmitočet vzorkování vyhovovat Nyquistovu vzorkovacímu teorému, tedy

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_m \quad (4.1)$$

Kmitočtové spektrum

Na modulovaný signál PAM lze pohlížet jako na násobení modulačního signálu $m(t)$ vzorkovací funkcí resp. každou ze spektrálních složek této funkce. Proto každá z těchto složek sama vymizí, ale po jejich stranách se vytvoří páry postranních pásem. Při nejvyšším možném

kmitočtu f_m , který je obsažen v modulačním signálu, zaujímá každý pár celkovou šířku pásma $2f_m$. Kmitočtové spektrum s věrným vzorkováním je na obrázku 16.



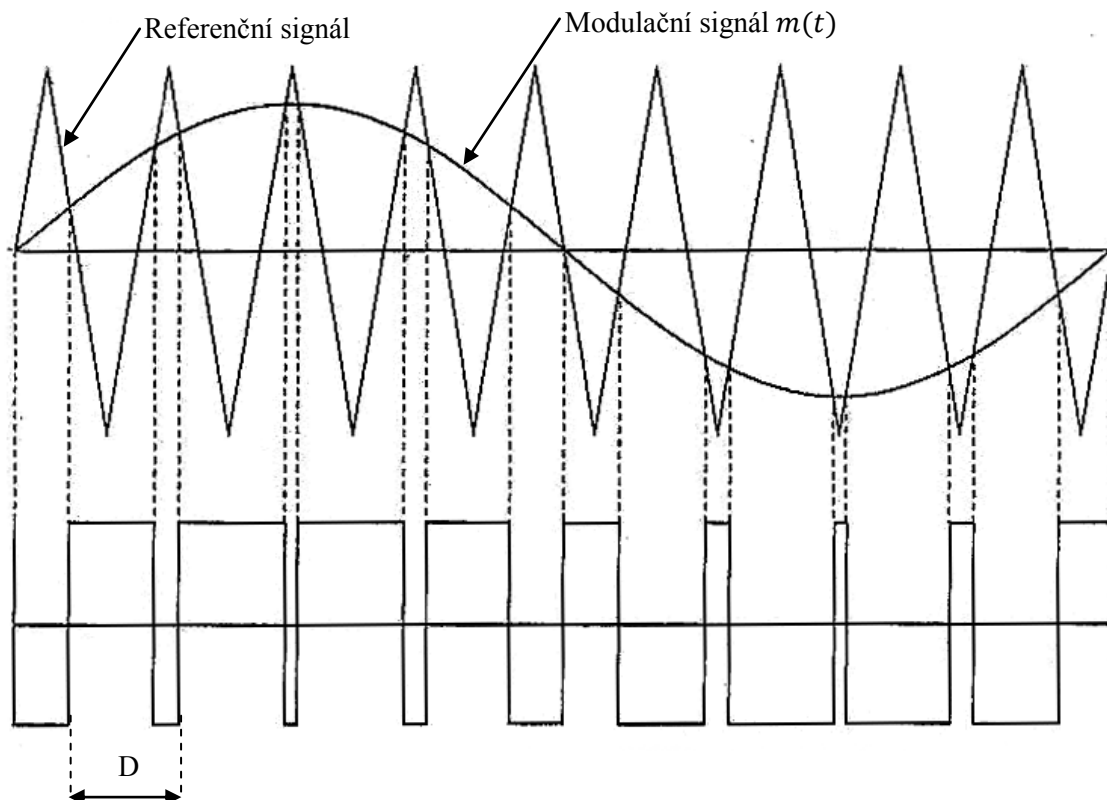
Obrázek 16: Kmitočtové spektrum PAM modulace [1]

4.1.2 Modulace PWM

U impulzové nosné vlny se může měnit nejen amplituda, ale i šířka impulzů, vzniká nám tedy impulzová šířková modulace, která se označuje jako PWM. V praxi se modulace PWM využívá nejčastěji v DC/DC měničích, střídačích, frekvenčních měničích a s kombinací dolnofrekvenční propusti jako D/A převodník.

Princip

Amplituda a opakovací frekvence impulzů jsou konstantní, mění se pouze šířka impulzů tzv. střída obdélníkových impulzů. Tyto impulzy mají dva stavy, log 1/log 0 (zapnuto/vypnuto). Pro referenční signál PWM modulace se používá pilovitý nebo trojúhelníkový průběh signálu. Referenční signál se porovnává s amplitudou modulačního signálu $m(t)$. Je-li okamžitá hodnota modulačního signálu menší než hodnota okamžitého referenčního signálu, nabývá amplituda modulovaného signálu log 1. V opačném případě má modulovaný signál hodnotu log 0.

Obrázek 17: *Princip modulace PWM*

Střída

Vyskytuje se u periodických signálů, které během jedné periody změní stav z log 1 na log 0. Jedná se o poměr časů jednotlivých úrovní. Může být dán poměrem nebo procentuálně. Střída je dána vztahem

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (4.2)$$

kde τ je délka pulzu; T představuje periodu. [8]

4.1.3 Modulace PPM

Pulzní polohová modulace PPM se využívá pro převod analogového signálu na specifický digitální impulzový signál. Základem jsou impulzy, které mají konstantní amplitudu i velikost, mění se pouze jejich pozice podle modulovaného signálu. V modulátoru se srovnává amplituda modulačního signálu s amplitudou pilovitého signálu. Průsečík těchto hodnot znamená posunutí od základní polohy pro každý vzorek. [5]

4.2 Kódované modulace

Z historického hlediska jsou kódované modulace mladší než nekódované modulace z předchozí kapitoly (4.1). Binární kódované modulace se dále využívají k diskretní (digitální) modulaci v přeneseném pásmu. Mezi nejstarší a nejrozšířenější kódované modulace patří impulzová kódovaná modulace PCM, při které se nejprve modulační signál přemění na signál PAM, který se následně podrobí kvantování a v poslední řadě kódování. Modifikací PCM modulace je modulace DPCM, která přenáší informaci o velikosti kvantovaného rozdílu tohoto vzorku a jeho předpokládané hodnoty. Dalším zástupcem této kategorie je modulace delta DM. U modulace delta se přenáší zakódovaná jednobitová informace o rozdílu mezi skutečnou a předchozí hodnotou vzorku. [1] [2]

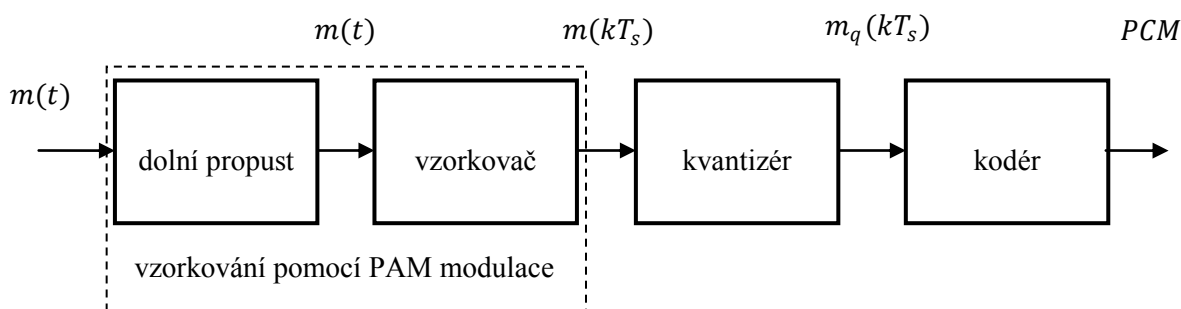
4.2.1 Modulace PCM

Nejstarší a nejrozšířenější kódovaná modulace v základním pásmu. Využívá se zejména pro převod analogového signálu na digitální signál, který obsahuje sériový bitový tok informací. Díky relativně levné realizaci pomocí integrovaných obvodů našla modulace PCM uplatnění v mnoha elektronických aplikacích jako např. při záznamu audio CD, při telekomunikacích aj.

Nevýhodou PCM modulace je omezení šířky pásma převáděného analogového signálu.

Princip

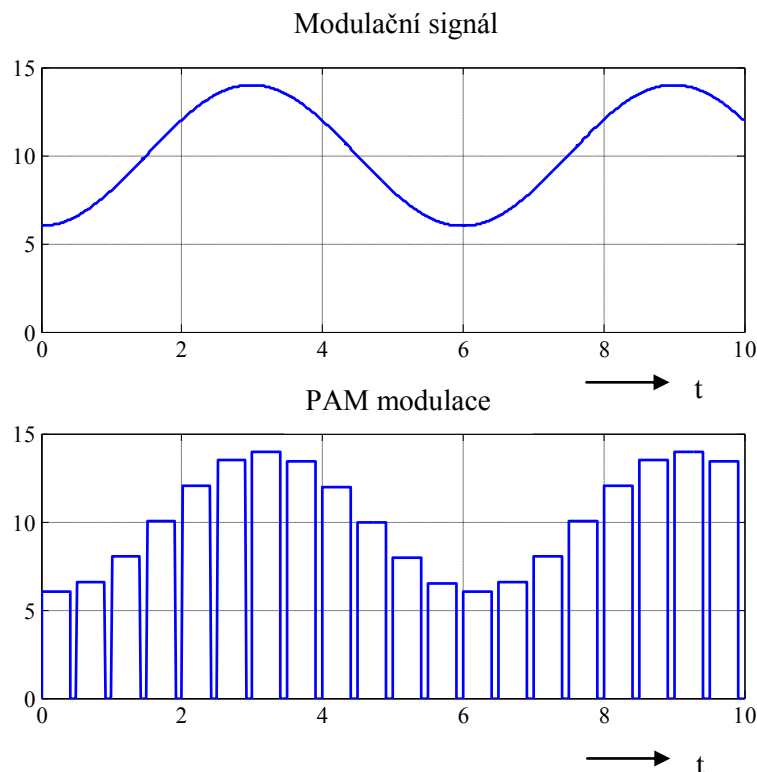
Modulační signál nejprve prochází dolní propustí, která vstupní signál frekvenčně omezí. Signál dále pokračuje na vzorkovač, kde se transformuje na PAM, složený z diskretních vzorků $m(kT_s)$. Transformovaný signál se podrobí kvantování, při kterém se určí konečný počet q hladin, které se označují jako kvantizační úrovně. Kvantované impulzy $m_q(kT_s)$ následně vstupují do kodéru, jehož výstupem je modulovaný signál PCM (obr. 18).



Obrázek 18: Princip pulzní kódované modulace [2]

Vzorkování

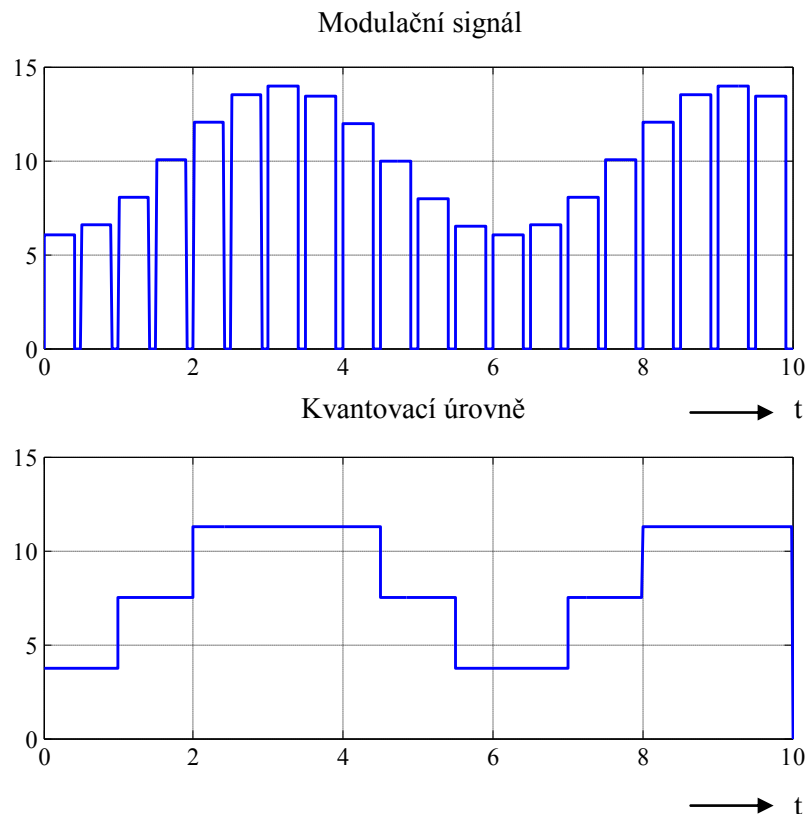
Využívá se modulace PAM s okamžitým vzorkováním a definovaným vzorkovacím kmitočtem, který je určen pomocí vzorkovacího obvodu. Více kapitola 4.1.1 Modulace PAM.



Obrázek 19: Modulace PAM s okamžitým vzorkováním [5]

Kvantování

Je to proces ztrátový a nevratný. Probíhá po vzorkování signálu, kdy se amplitudovým hodnotám PAM signálu přiřadí nejbližší hodnoty kvantizačních úrovní. Velikost mezi úrovněmi se mění skokem. Kvantizační úrovně jsou rozděleny po celkovém rozsahu signálu buď to rovnoměrně anebo nerovnoměrně. Signál, který projde kvantováním, nabývá M možných kvantovacích úrovní. Uprostřed mezi úrovněmi jsou tzv. rozhodovací body, které nám rozhodují, zda se daný bod přiřadí k vyšší nebo nižší kvantovací úrovni. Tím vzniká určité zkreslení, kterému se říká kvantizační zkreslení. Potlačit kvantizační zkreslení můžeme zvětšením kvantizačních úrovní a počtu vzorků. [5]



Obrázek 20: Rovnoměrné kvantování [5]

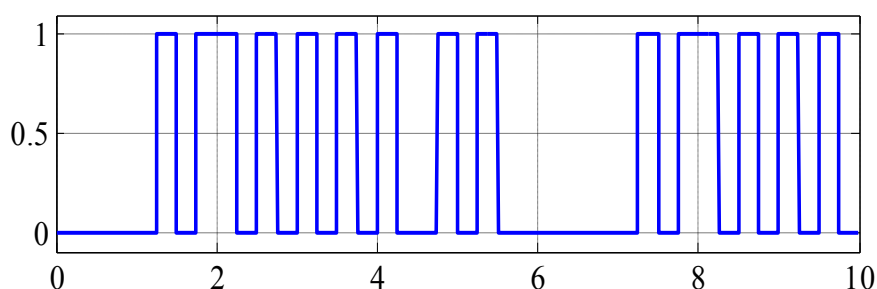
Rovnoměrná kvantizace je rozmístěna rovnoměrně v rozsahu kvantovacích úrovní, jedná se o jednodušší variantu kvantování. Oproti tomu nerovnoměrná kvantizace se využívá v aplikacích, kde je vstupní signál nerovnoměrně rozložený nebo je menší než napěťový rozsah daných kvantizačních úrovní.

Kódování

Kvantované impulzy $m_q(kT_s)$ lze vyjádřit pomocí kódových prvků, které vytvářejí kódová slova. Binární kódové slovo může nabývat hodnoty log 1 nebo log 0. Hlavní výhodou binárního kódování je vysoká odolnost vůči šumu. Za předpokladu, že binární kód obsahuje n bitů, je počet kvantizačních úrovní dán vztahem

$$M = 2^n \quad (4.3)$$

Kódování rozdělujeme na unipolární, kde napěťové hodnoty kódu jsou pouze kladné, a na bipolární, kde napěťové hodnoty jsou záporné i kladné. [5]



Obrázek 21: Kódovaný signál PCM [5]

Šířka pásma

Šířka PCM modulace je závislá na bitové rychlosti (4.4) a tvaru impulzu.

$$R = n \cdot f_s \quad (4.4)$$

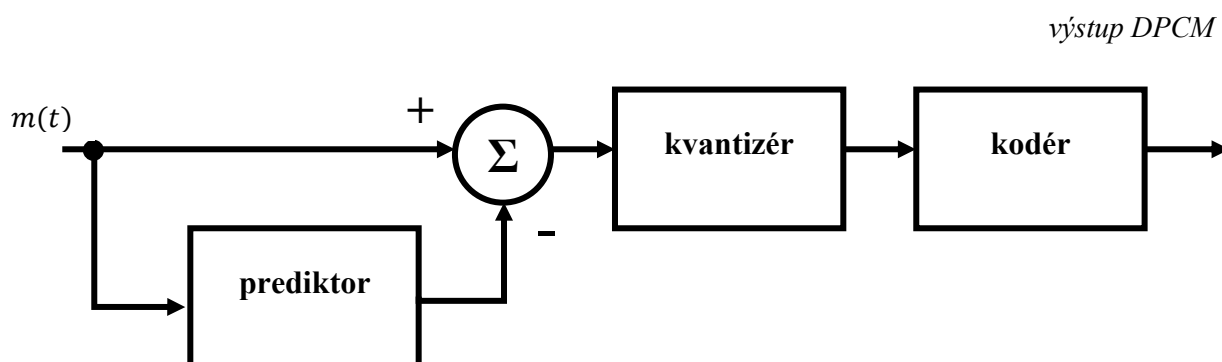
kde n počet bitů PCM slova; f_s je vzorkovací frekvence.

Aby nedocházelo ke zkreslení signálu, musí být dodržen vzorkovací teorém $f_s > 2B$, kde B představuje šířku analogového signálu. Šířka frekvenčního spektra je tedy dána vztahem

$$B_{PCM} = R = n \cdot f_s \quad (4.5)$$

4.2.2 Diferenční kódovaná modulace DPCM

Na rozdíl od PCM modulace je přenášena informace o velikosti kvantovaného rozdílu a její předpokládané (predikované) hodnoty, která je odvozena od analýzy předchozích vzorků. Jestliže není možná analýza předchozích vzorků, anebo velmi obtížná, dochází v modulaci DPCM k velkému zkreslení. K přenosu jsou pak využívány menší kódové skupiny, a to má za následek i menší šířku pásma oproti PCM. [2]



Obrázek 22: Princip DPCM modulace

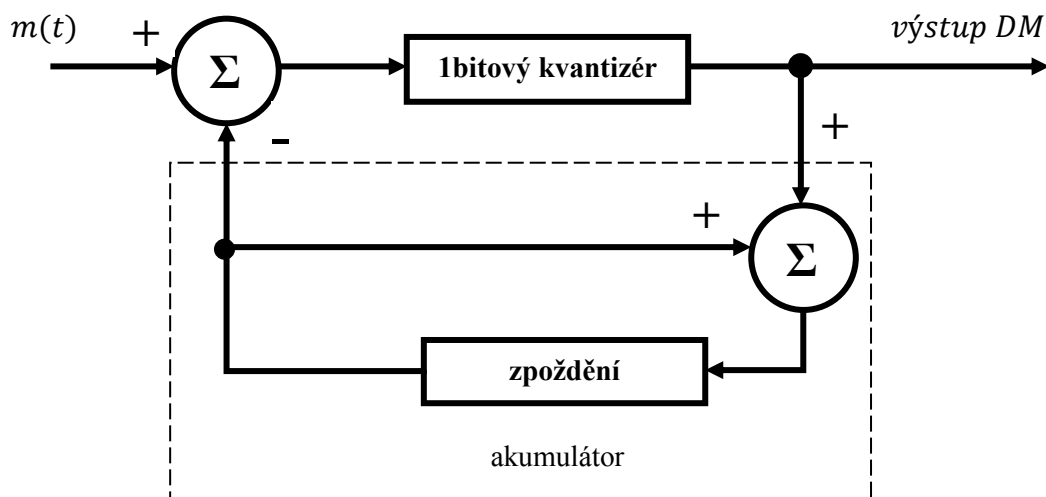
K predikci neboli analýze se nejčastěji využívá filtr se zpožďovací linkou s odbočkami, který se označuje jako transversální filtr.

4.2.3 Modulace Delta DM

Využívá se pro přenos informace, při které není kladen důraz na kvalitu. Jedná se o jednobitovou modulaci DPCM, která se často označuje jako lineární modulace Delta LDM. Hlavní výhodou DM modulace je jednodušší technická realizace než u PCM. Mezi nevýhody řadíme dva typy zkreslení, které lze částečně potlačit zvýšením vzorkovací frekvence f_s a volbou kvantizačního kroku Δ .

Princip

Na rozdíl od modulace PCM se přenáší informace o rozdílu mezi skutečnou hodnotou amplitudy a hodnotou předchozího vzorku. V sumačním členu (obr. 23) se nejprve vytvoří rozdíl mezi nekvantovaným současným vzorkem a předchozím vzorkem. Vzniklý rozdíl se podrobí jednobitovému kvantování, které má pouze dvě úrovně. Větev, ve které je obsažen zpožďovací obvod se nazývá akumulátor, který vytváří schodovitou aproximaci. Výstup z jednobitového kvantizéru je následně signál s DM modulací. [2]



Obrázek 23: Princip modulace DM

4.2.4 Adaptivní modulace Delta ADM

Odvozená od modulace DM. Částečně řeší nedostatky DM modulace, a to hlavně změnou kvantizačního kroku. Často se označuje jako modulace Delta s proměnným kvantizačním krokem. Obsahuje ve své zpětné vazbě nelineární aktivní prvek, takže ve své podstatě se jedná o nelineární modulaci. Modifikací ADM modulace byla vyvinuta celá řada. Základním parametrem je, že při rychlé změně modulačního signálu se kvantizační kroky aproximovaného signálu zvětšují a při pomalé aproximaci změny signálu se kvantizační kroky zmenšují. Nejrozšířenější algoritmus pro změnu kvantizačních úrovní je Winklerův algoritmus.

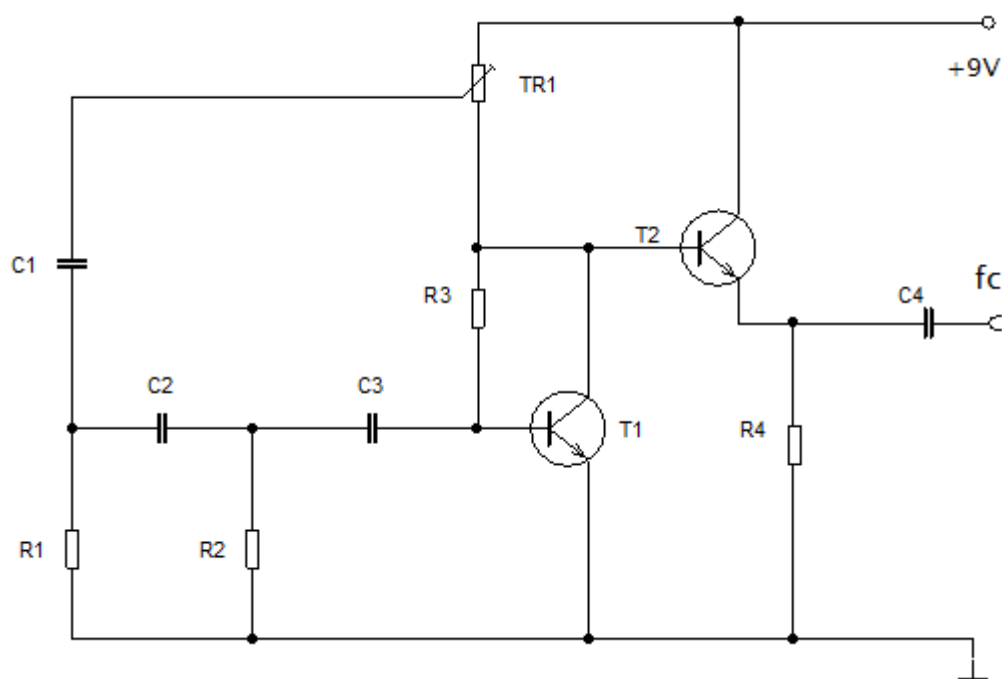
[1]

5 Praktická část

Pro demonstrování amplitudové modulace jsem zvolil modulátor s transkonduktančním operačním zesilovačem, který se využívá v moderních radiových vysílačích. Modulátor je doplněn RC oscilátorem, který zajišťuje nosnou vlnu. Demodulační obvod je tvořen aktivním demodulátorem, který demodulovaný signál zároveň částečně zesílí.

5.1 RC oscilátor

Jedná se o zpětnovazební oscilátor RC v zapojení se společným emitorem a kladnou zpětnou vazbou. Řídící obvod je sestaven z derivačních RC členů, které určují kmitočet obvodu. V obvodu jsou použity tři fázové RC články, každý z nich má za úkol posouvat fázi o 60° . Zapojení je zobrazeno na obr. 24. Nosná frekvence je 10,8 kHz s amplitudou 1,46Vpp. Napájecí napětí je +9V.



Obrázek 24: Schéma RC oscilátoru

Rozpis součástek

R1 = 4k7 Ω

R2 = 4k7 Ω

R3 = 1.5M Ω

R4 = 1k Ω

C1 = 1nF

C2 = 1nF

C3 = 1nF

C4 = 1 μ F/63V

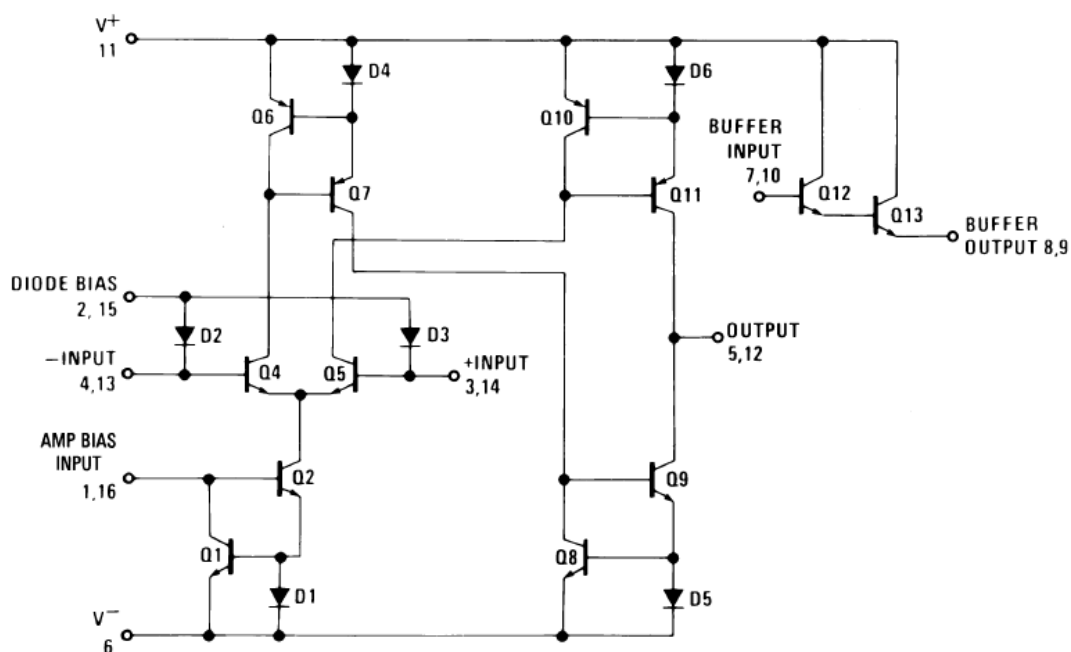
TR1 = 5k Ω , lineární

T1 = BC547

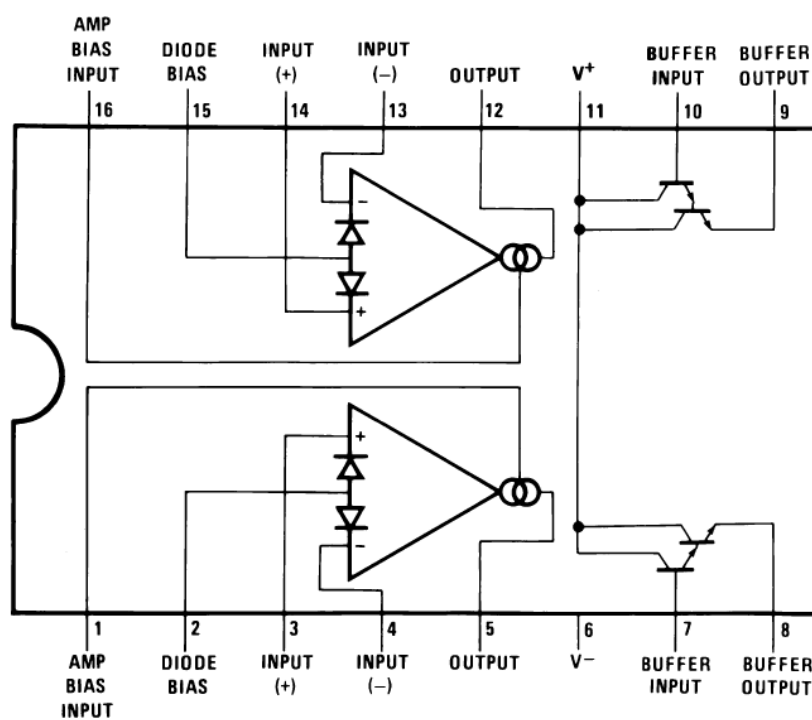
T2 = BC547

5.2 Transkonduktanční modulátor

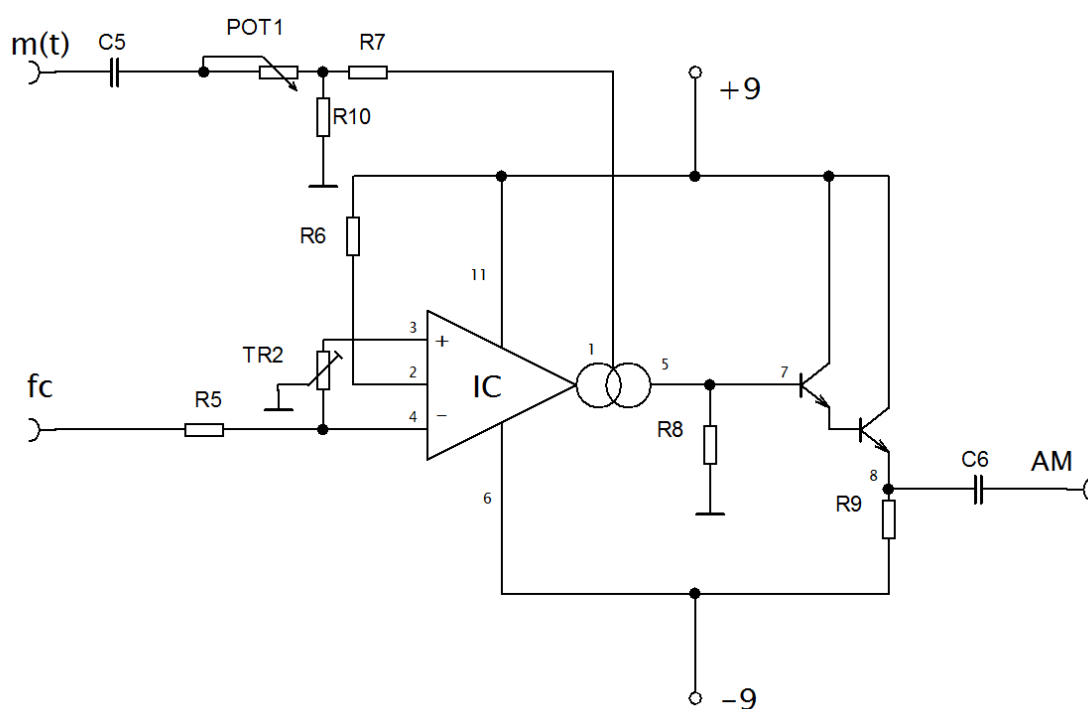
Zapojení modulátoru jsem zvolil s pomocí transkonduktančního operačního zesilovače (OTA) LM 13700. OTA obsahuje symetrický napěťový vstup, který přemění na proudový signál. Hlavní výhodou modulátoru je vysoká linearita při plné hloubce modulace. Obvod je napájen symetrickým napájením $\pm 9V$. Nosná vlna je přiváděna na pin č. 4 a 3. Modulační signál, který je přiveden na pin č. 1, lze regulovat pomocí potenciometru POT1 a tím měnit hloubku modulace.



Obrázek 25: Vnitřní struktura LM13700 [9]



Obrázek 26: Vývody LM13700 [9]



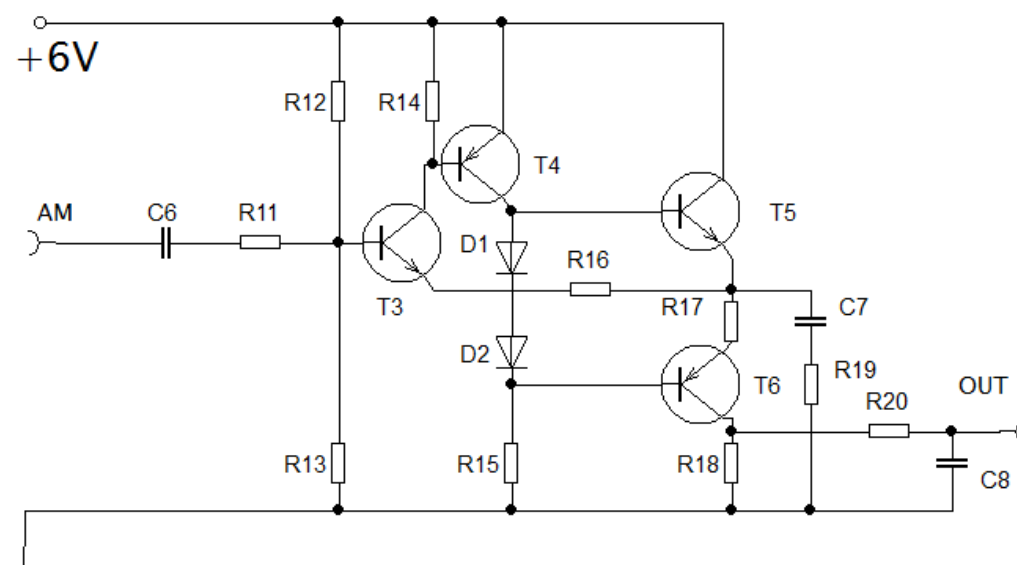
Obrázek 27: Schéma zapojení modulátoru

Rozpis součástek

R5 =	27k Ω	POT1 =	25k Ω , lineární
R6 =	10k Ω	TR2 =	1k Ω , lineární
R7 =	2.2k Ω		
R8 =	33k Ω	C5 =	470nF
R9 =	4.7k Ω	C6 =	470nF
R10 =	10k Ω		
		IC =	LM13700N

5.3 Aktivní demodulátor

Jelikož z demodulátoru vychází nízká úroveň signálu, zvolil jsem aktivní demodulátor s tranzistorem a diodou. Následující zapojení se vyznačuje velkou citlivostí. Tranzistory T3 a T4 fungují jako zesilovací stupeň. Diody D1 a D2 vysokofrekvenční signál oříznou. Změnou rezistoru R19 lze změnit citlivost demodulátoru. Odpor R20 a kondenzátor C8 tvoří výstupní filtr, který má za úkol oddělit vysokofrekvenční signál od nízkofrekvenčního.



Obrázek 28: Schéma zapojení aktivního demodulátoru

Rozpis součástek

R11 =	100 Ω	C6 =	470nF
R12 =	20k Ω	C7 =	100nF
R13 =	47k Ω	C8 =	100nF
R14 =	5.1k Ω	D1 =	1N4007
R15 =	3.2k Ω	D2 =	1N4007
R16 =	200 Ω	T3 =	BC547
R17 =	10 Ω	T4 =	BC557
R18 =	2k Ω	T5 =	BC547
R19 =	50 Ω	T6 =	BC557
R20 =	1.2k Ω		

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit okolí se základním rozdělením modulačních metod, které se používají v nf a vf aplikacích. Jako další bod byl vytvořit funkční laboratorní přípravek, na kterém lze demonstrovat analogovou amplitudovou modulaci a vypracovat vzorový protokol o měření.

Ve druhé kapitole jsem uvedl základní definici modulace a její důvod proč ji využíváme. Dále je v kapitole uveden základní přenosový řetězec. V kapitole byl popsán historický vývoj modulací a jejich základní členění.

Třetí kapitola popisuje modulace, které se transformují na nosný kmitočet. Jako první je zde popsána analogová modulace, která je historicky nejstarší. Popisuje nám, jak se vysokofrekvenční vlna mění v závislosti na modulačním signálu pomocí fáze, frekvence anebo amplitudy. Ve druhé podkapitole se práce zabývá nejmladším typem modulace, a to digitální modulací, jež se hojně využívá v dnešní digitální době.

Čtvrtá kapitola je věnována modulacím v základním pásmu, jenž slouží k následné úpravě signálu. Kapitola je rozdělena na dvě části, kódované a nekódované modulace.

Další kapitola, s pořadovým číslem pět, nese název Praktická část, kde jsem sestrojil obvod pro demonstraci amplitudové analogové modulace a její následné demodulace. Obvod se skládá z RC oscilátoru, transkonduktančního modulátoru a aktivního demodulátoru.

Kompletní schéma zapojení, rozpis součástek, návrh plošného spoje, finální fotografie výrobku a vypracovaný vzorový protokol obsahuje sekce Přílohy.

Jako vylepšení v zapojení bych do budoucna přidal zesilovací stupeň na výstupu aktivního demodulátoru. Další vylepšení by se mělo týkat oscilátoru nosné vlny, aby bylo možné přepínat mezi různými tvary signálů, a tím dokázat, že sinusový signál je pro amplitudovou modulaci nejlepší.

Přínosem bakalářské práce je seznámení veřejnosti se základním rozdělením modulačních metod a praktické demonstrování analogové amplitudové modulace.

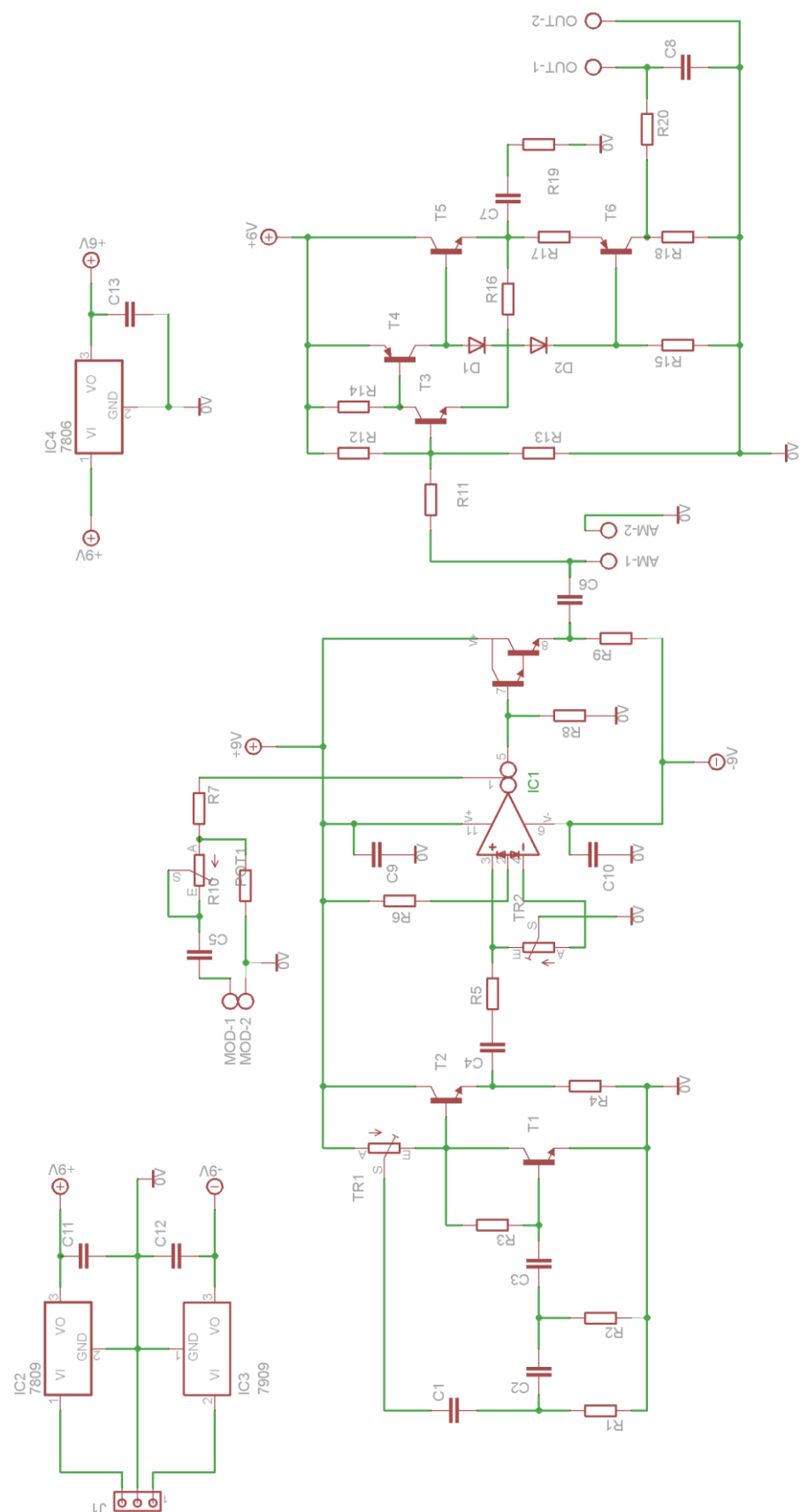
Použitá literatura

- [1] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000. 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [2] DOBEŠ, J. – ŽALUD, V. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 767 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [3] SÝKORA, Jan. *Teorie digitální komunikace*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 329 s. ISBN 80-01-02478-4.
- [4] SÝKORA, Jan. *Digitální rádiová komunikace II*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 350 s. ISBN 80-01-01374-X.
- [5] MACHÁČEK, Z. – NEVŘIVA, P. *Modulované signály*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. 267 s. ISBN 978-80-248-2600-4.
- [6] PROKEŠ, Aleš. *Komunikační systémy*. Brno: FEKT VUT Brno, Ústav radioelektroniky, 2011. 61 s.
- [7] TŮMA, J. – NEVŘIVA, P. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1997. 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [8] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Střída (elektronika)* [online]. [cit. 20. 04. 2013]. Dostupné z WWW:
<[http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=St%C5%99%C3%ADda_\(elektronika\)&oldid=9883905](http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=St%C5%99%C3%ADda_(elektronika)&oldid=9883905)>
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. LM13700 Dual Operational Transconductance [online]. 1999. [cit. 27. 04. 2013]. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>>

Seznam příloh

Příloha.A:	Schéma zapojení laboratorní úlohy	I
Příloha.B:	Seznam součástek.....	II
Příloha.C:	Návrh plošného spoje	III
Příloha.D:	Fotografie finálního výrobku.....	IV
Příloha.E:	Vypracovaný vzorový protokol	V

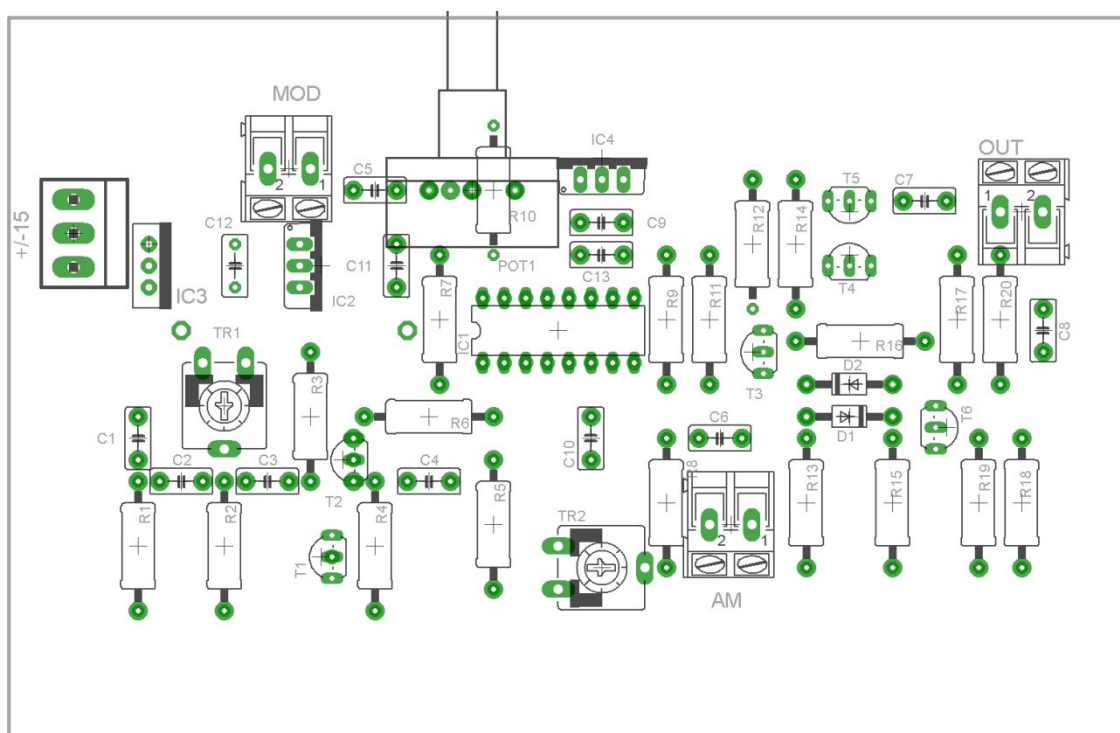
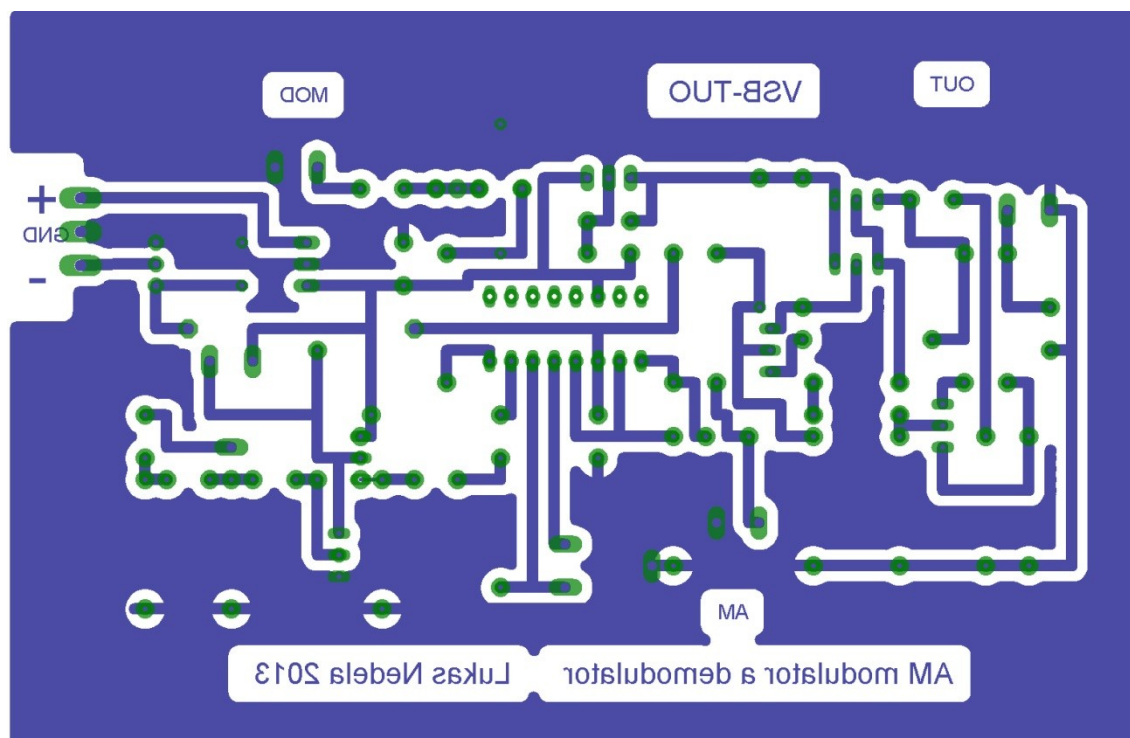
Příloha.A: Schéma zapojení laboratorní úlohy



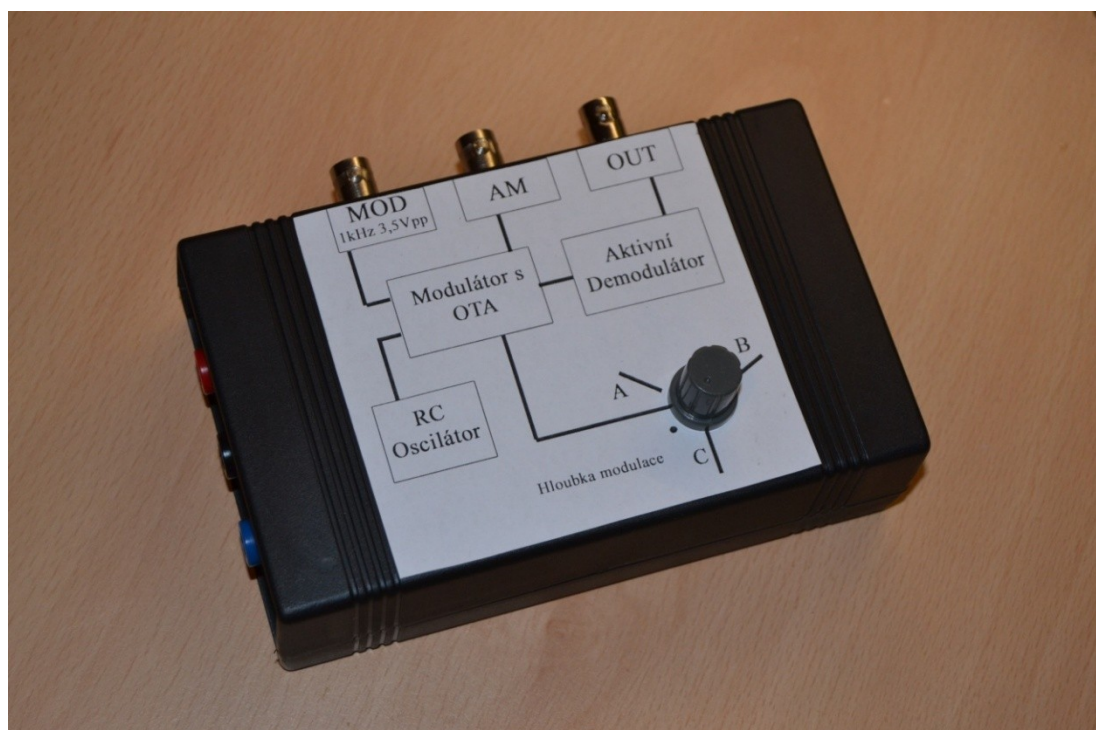
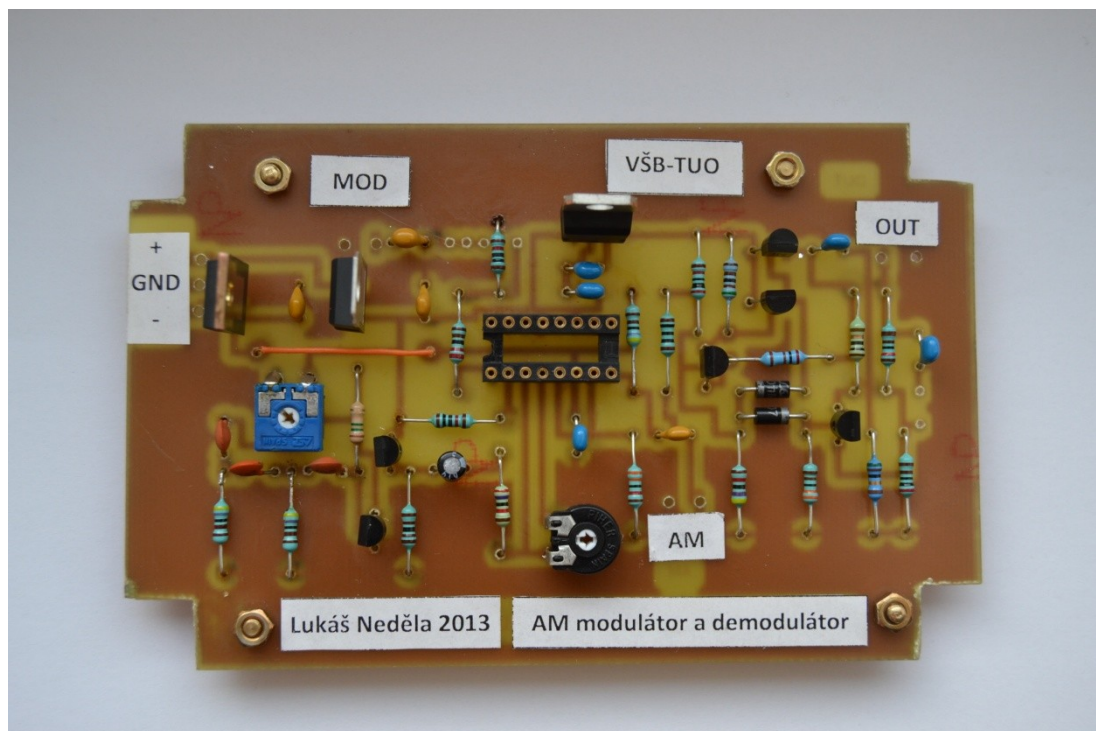
Příloha.B: *Seznam součástek*

R1 = 4k7 Ω	C5 = 470nF
R2 = 4k7 Ω	C6 = 470nF
R3 = 1.5M Ω	C7 = 100nF
R4 = 1k Ω	C8 = 100nF
R5 = 27k Ω	C9 = 100nF
R6 = 10k Ω	C10 = 100nF
R7 = 2.2k Ω	C11 = 100nF
R8 = 33k Ω	C12 = 100nF
R9 = 4.7k Ω	C13 = 100nF
R10 = 10k Ω	D1 = 1N4007
R11 = 100 Ω	D2 = 1N4007
R12 = 20k Ω	TR1 = 5k Ω , lineární
R13 = 47k Ω	TR2 = 1k Ω , lineární
R14 = 5.1k Ω	POT1 = 25k Ω , lineární
R15 = 3.2k Ω	T1 = BC547
R16 = 200 Ω	T2 = BC547
R17 = 10 Ω	T3 = BC547
R18 = 2k Ω	T4 = BC557
R19 = 50 Ω	T5 = BC547
R20 = 1.2k Ω	T6 = BC557
C1 = 1nF	IC1 = LM13700N
C2 = 1nF	IC2 = LM7809
C3 = 1nF	IC3 = LM7909
C4 = 1 μ F/63V	IC4 = LM7806

Příloha.C: Návrh plošného spoje



Příloha.D: Fotografie finálního výrobku





Laboratorní úloha č. 1

Amplitudový modulátor a demodulátor

Jméno, Příjmení: Lukáš Neděla

Osobní číslo: NED100

Skupina: LB3AKE01

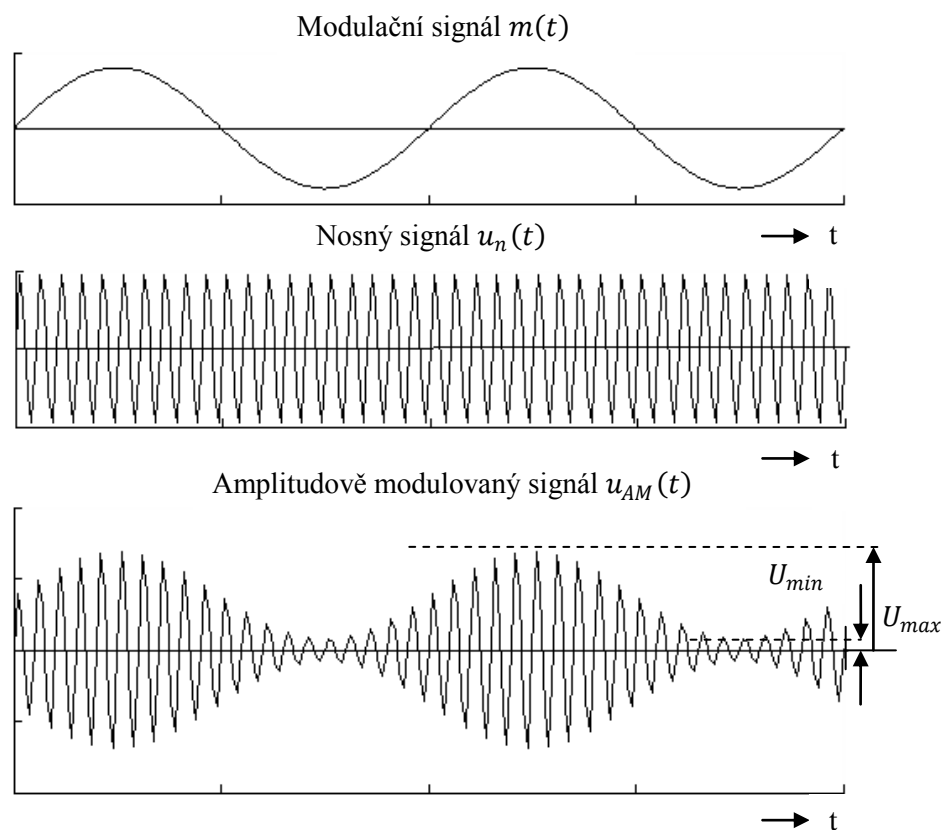
Datum měření: 19. 4. 2013

Teoretický rozbor

Amplituda vysokofrekvenčního nosného signálu se mění v závislosti na okamžité hodnotě nízkofrekvenčního modulačního signálu. Amplituda modulačního signálu je v každém okamžiku součet nebo rozdíl amplitudy nosného signálu. Mění se pouze amplituda vysokofrekvenčního signálu, frekvence zůstává konstantní. Výsledný modulovaný signál pak popisuje vztah

$$u_{AM}(t) = [U_c + U_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) = U_c [1 + m_a \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

kde U_c je amplituda a f_c frekvence nosné vlny, U_m amplituda modulačního signálu a f_m je frekvence modulačního signálu.



Činitel modulace je dán poměrem amplitudy modulačního signálu a amplitudy nosného signálu.

$$m_a = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})} = \frac{U_m}{U_n} \cdot 100 [\%]$$

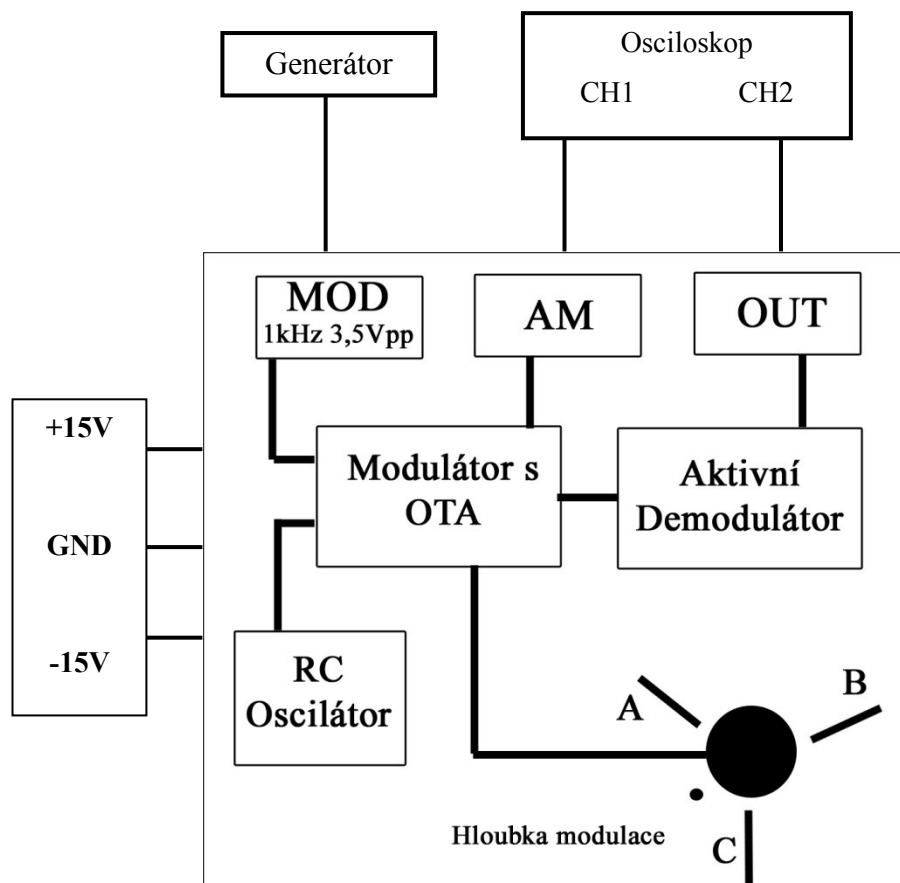
Zadání

1. Určete frekvenci a amplitudu nosného signálu.
2. Pro modulační signál 1 kHz, 3,5Vpp určete hloubku modulace v bodech A, B a C.
3. Pro hodnoty A, B a C zobrazte demodulovaný signál, určete frekvenci a amplitudu, výsledky porovnejte s modulačním signálem.
4. Naměřené průběhy zaznamenejte a uveďte jaký vliv má hloubka modulace na výsledný demodulovaný signál.

Postup měření

Připojíme symetrické napětí $\pm 15\text{V}$ na svorky. Na výstup AM připojíme CH1 kanál osciloskopu a na svorku OUT CH2 kanál osciloskopu. Na kanálu CH1 odečteme frekvenci a amplitudu nosného signálu. Na generátoru nastavíme sinusový signál 1 kHz s hodnotou 3,5Vpp a připojíme na konektor MOD. Na potenciometru přípravku nastavíme hodnotu A, pomocí kanálu CH1 určíme hloubku modulace a zobrazený signál zaznamenáme. Následně nastavíme hodnoty B a C a měření opakujeme. Pomocí kanálu CH2 zobrazíme výsledný demodulovaný signál, určíme hodnotu amplitudy a frekvence pro úrovně A, B a C.

Schéma zapojení



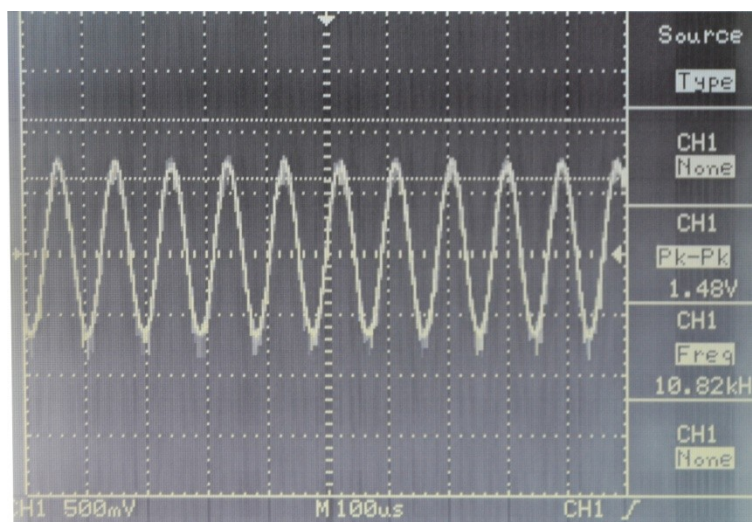
Použité přístroje

Generátor Tesla BM534

Digitální osciloskop MCP DQ2025

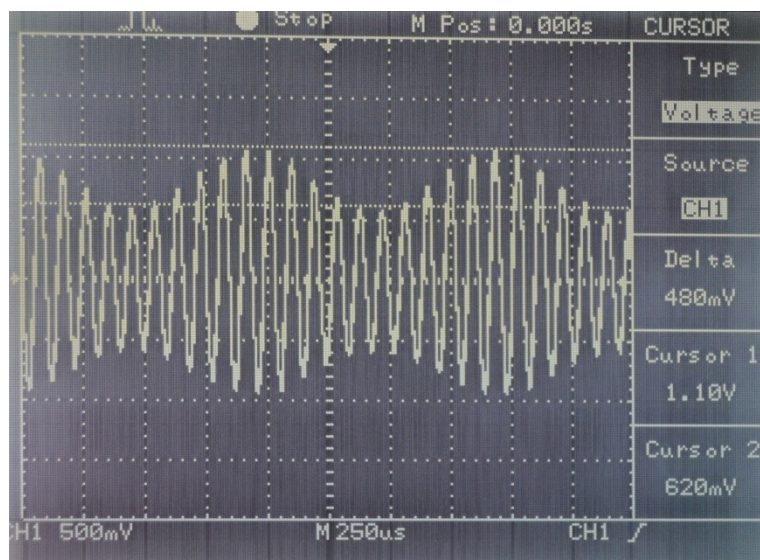
Vypracování

1.



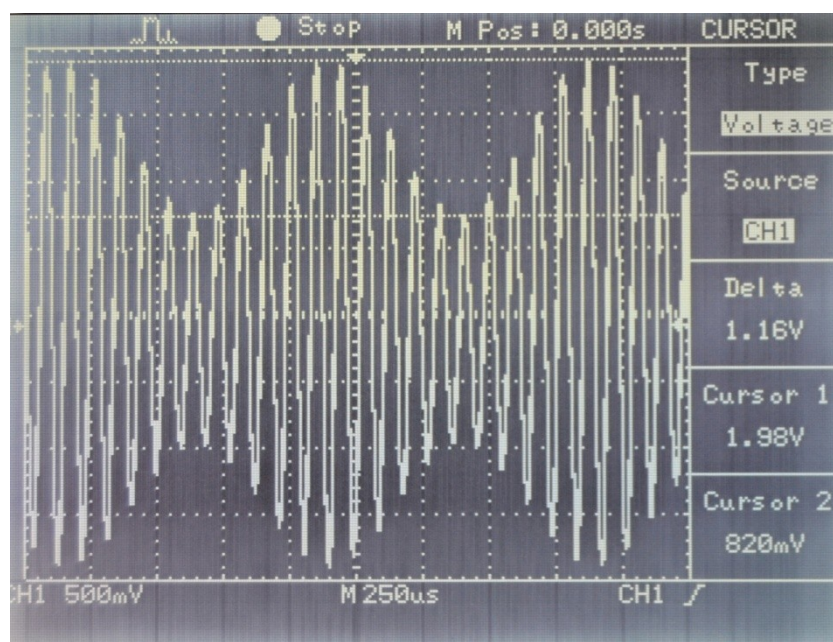
Nosná frekvence laboratorního přípravku je 10,82 kHz s amplitudou 0,74V.

2. Hodnota A



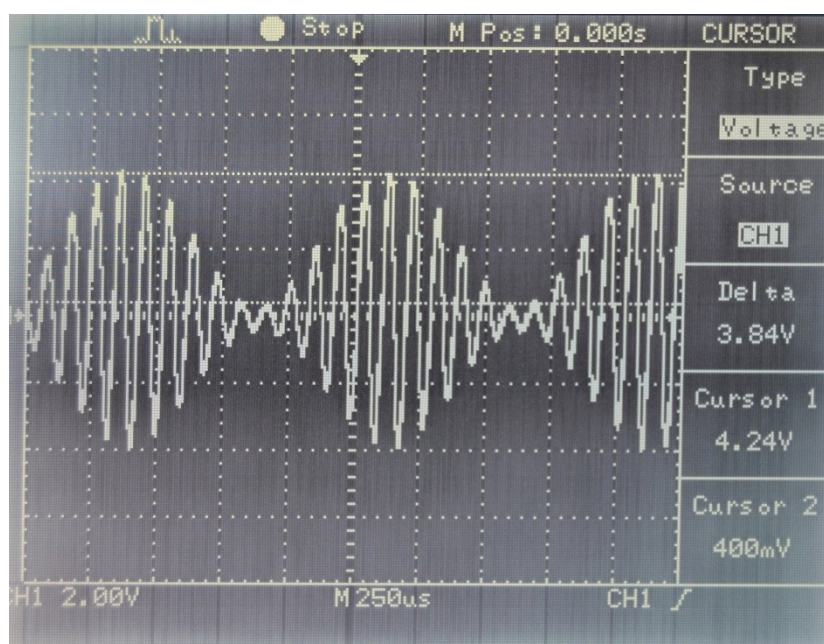
$$m_a = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})} = \frac{(1,1 - 0,62)}{(1,1 + 0,62)} \cdot 100 = 28\%$$

Hodnota B



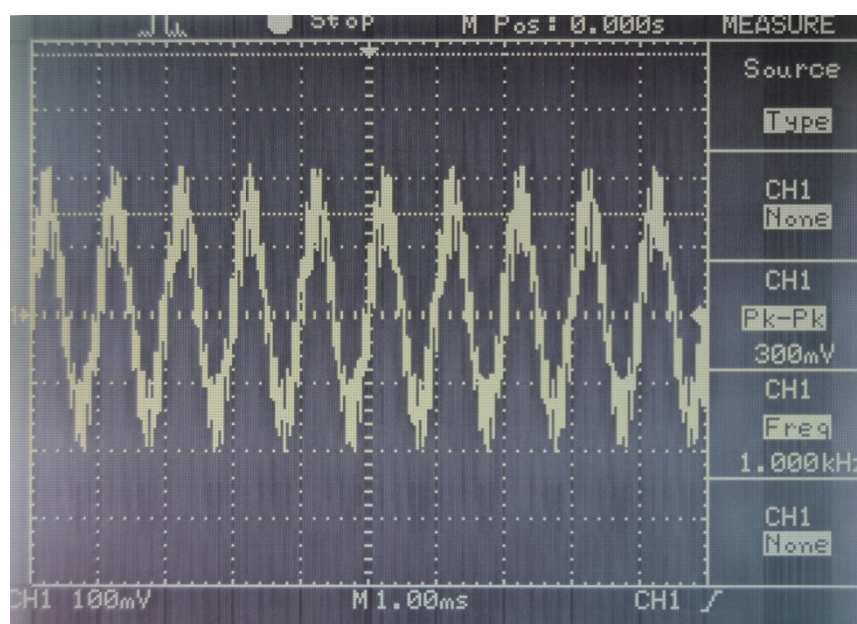
$$m_a = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})} = \frac{(1,98 - 0,82)}{(1,98 + 0,82)} \cdot 100 \doteq 41\%$$

Hodnota C



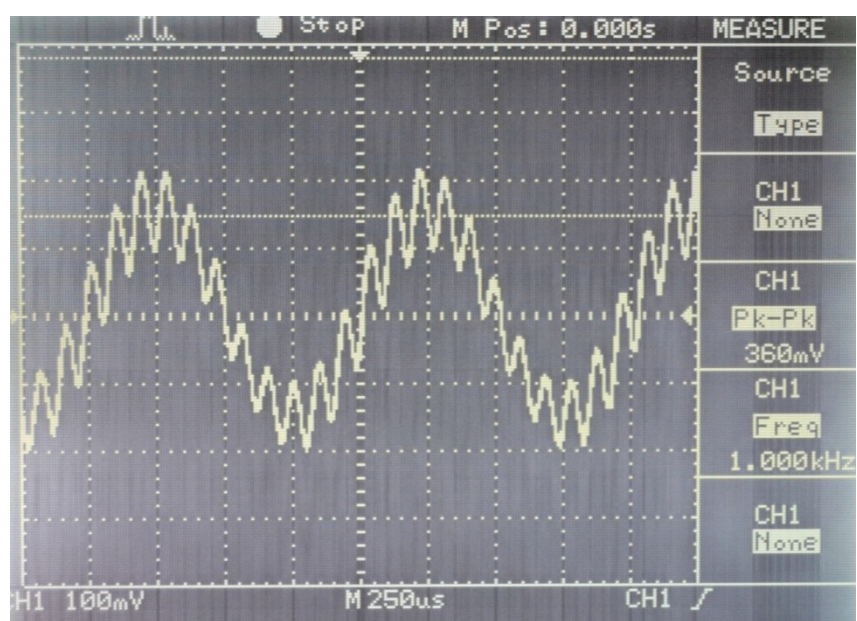
$$m_a = \frac{(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})} = \frac{(4,24 - 0,4)}{(4,24 + 0,4)} \cdot 100 \doteq 83\%$$

3. Hodnota A



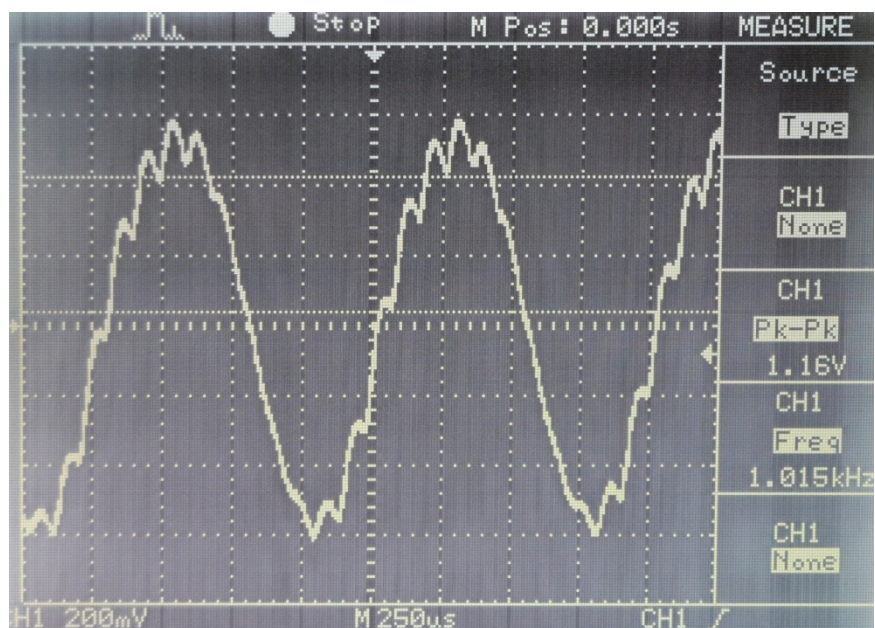
Demodulovaná frekvence je 1 kHz a amplituda 150mV.

Hodnota B



Demodulovaná frekvence je 1 kHz a amplituda 180mV.

Hodnota C



Demodulovaná frekvence je 1,015 kHz a amplituda 580mV.

Závěr

Jako první jsem zjistil frekvenci nosné vlny, která je 10,82 kHz s amplitudou 0,74V. Jako další jsem měl za úkol určit hloubku modulace pro úrovně A, B a C. Pomocí kurzorů jsem určil maximální a minimální hodnoty amplitud, podle kterých jsem vypočítal hloubku modulace. Pro úroveň A je hodnota modulace 28%, pro úroveň B 41% a pro úroveň C 82%. Frekvence demodulovaného signálu odpovídá modulační frekvenci. Úroveň amplitudy se měnila v závislosti na hloubce modulace, pro hodnoty A a B je demodulovaný signál značně zkreslený. Nejmenší zkreslení má úroveň C.